



การอบปกติเพื่อปรับปรุงสมบัติของเหล็ก ST 37

NORMALIZING FOR IMPROVING MECHANICAL PROPERTIES OF ST 37

นายกิตติพงศ์ คำไพเราะพันธุ์ รหัส 49380134
นางสาวนุชจรี เย็นขัน รหัส 49380172

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ.....
เลขทะเบียน 15 67704 e.2
เลขเรียกหนังสือ.....
ปร. 66740
มหาวิทยาลัยอเนกธรรม 2552

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอเนกธรรม

ปีการศึกษา 2552



ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ การออกแบบเพื่อปรับปรุงสมบัติของเหล็ก ST 37
ผู้ดำเนินโครงการ นายกิตติพงษ์ กำไพเราะพันธุ์ รหัส 49380134
 นางสาวนุชจรี เข็นขัน รหัส 49380172
ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์ศรีสังจา วิทยศักดิ์
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา 2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

.....ที่ปรึกษาโครงการ

(อาจารย์ศรีสังจา วิทยศักดิ์)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. กวิน สนธิเพิ่มพูน)

.....กรรมการ

(อาจารย์ธนา บุญฤทธิ)

.....กรรมการ

(อาจารย์เสาวลักษณ์ ทองกลิ่น)

.....กรรมการ

(อาจารย์วัฒน์ชัย เขาวรัตน์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การอบปกติเพื่อปรับปรุงสมบัติของเหล็ก ST 37	
ผู้ดำเนินโครงการ	นายกิตติพงษ์ คำไพเราะพันธุ์	รหัส 49380134
	นางสาวนุชจรี เย็นขัน	รหัส 49380172
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์ศรีสัจจา วิทยศักดิ์	
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ	
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ	
ปีการศึกษา	2552	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงความแตกต่างของสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็ง ความทนต่อแรงดึง โมดูลัสของความยืดหยุ่น และเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น รวมทั้ง โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเกรด St 37 ระหว่างก่อนการอบปกติ และหลังการอบปกติ โดยได้มีการกำหนดตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัยคือ วัสดุที่ใช้เป็นเหล็กเกรด ST37 ผ่านกระบวนการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น 3 เปอร์เซ็นต์ และ 5 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบปกติได้แก่ 850 องศาเซลเซียส, 900 องศาเซลเซียส และ 1,000 องศาเซลเซียส


ซึ่งผลที่ได้จากงานวิจัย คือ เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นในการทำการอบปกติมีความสัมพันธ์กับค่าความแข็ง ค่าความทนต่อแรงดึง ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ค่าของเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น และขนาดเกรนของเหล็ก โดยที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นสูงขึ้นค่าความแข็ง ค่าความทนต่อแรงดึง ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้น ค่าของเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น และขนาดของเกรนจะลดลง เพราะว่าเหล็กที่ผ่านการการรีดเย็นจะมีความเครียดเกิดขึ้นภายในโครงสร้างทำให้สมบัติต่างๆ เปลี่ยนไป และอุณหภูมิในการอบปกติมีความสัมพันธ์กับค่าความแข็ง ค่าความทนต่อแรงดึง ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น และขนาดเกรนของเหล็ก โดยที่อุณหภูมิในการอบปกติสูงขึ้นค่าความแข็ง ค่าความทนต่อแรงดึง ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นจะลดลง ค่าของเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้น ขนาดของเกรนโตขึ้น เพราะว่าเหล็กที่ผ่านการอบปกติจะมีการจัดเรียงเกรนใหม่ ซึ่งจะส่งผลให้โครงสร้างและสมบัติเชิงกลของเหล็กเปลี่ยนแปลงไปด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จและถูส่งไปด้วยดีนั้นต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ศรีสังจา วิทยศศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ที่เกี่ยวข้องทุก ๆ ท่าน ที่คอยสนับสนุน ให้คำแนะนำทางด้านวิชาการเพื่อให้ความรู้และทักษะในการปฏิบัติงาน ในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ ครูช่างรณกฤต แสงผ่อง ครูช่าง สาลี วัตถุประสงค์และ ครูช่างวาทสิทธิ์ ภมร ที่ให้ความรู้ ทักษะในการทำการทดลองเพื่อนำผลที่ได้มาประกอบในการทำโครงการ และคอยสนับสนุน อำนวยความสะดวกในการปฏิบัติงานด้านต่างๆ และสถานที่อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหกรรม อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล ที่อำนวยความสะดวกในการปฏิบัติงาน

สุดท้ายขอขอบคุณผู้ดำเนินงานวิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิศา มารดา และเครือญาติ ที่คอยให้กำลังใจในการทำงาน และให้การสนับสนุนทางด้านทุนการศึกษาและการดำเนินงานวิจัย ซึ่งส่งผลทำให้โครงการวิจัยบรรลุผลสำเร็จได้



คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม
นายกิตติพงษ์ คำไพเราะพันธุ์
นางสาวนุชจรีย์ เย็นจัน
เมษายน 2553

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาบัตร.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output).....	1
1.4 เกณฑ์การชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome).....	2
1.5 ขอบเขตการทำโครงการ.....	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินการวิจัย.....	2
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย.....	2
1.8 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.9 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	4
2.1 ชนิดของเหล็กกล้า.....	4
2.2 การอบปกติ (Normalizing).....	8
2.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness test).....	11
2.4 การทดสอบความต้านแรงดึง (Tensile Test).....	14
2.5 การขึ้นรูปแบบเย็นและกรรมวิธีการขึ้นรูปแบบเย็น.....	15
2.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลทรรศน์ (Microscope).....	34
2.7 การวิเคราะห์เพื่อหาตัวแปรที่มีผลการอบปกติ (Analysis of Variance : ANOVA).....	39
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการโครงการ.....	51
3.1 ศึกษางานทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	51
3.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	51
3.3 การอบปกติ (Normalizing) ชิ้นงานตามอุณหภูมิที่กำหนด.....	53
3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	54
3.5 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค.....	56
3.6 การรีดเย็น.....	57
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์.....	58
4.1 การทดสอบความแข็ง.....	58
4.2 การทดสอบแรงดึง.....	65
4.3 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค.....	73
4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	83
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	93
5.1 บทสรุป.....	93
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	101
เอกสารอ้างอิง.....	102
ภาคผนวก ก. Heat treating specialties.....	102
ภาคผนวก ข. มาตรฐาน ASTM A370.....	106

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ.....	3
2.1 สมบัติเชิงกลของเหล็ก ST 37.....	4
2.2 แสดงการใช้งานของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ.....	7
2.3 แสดงความสามารถละลายธาตุคาร์บอนในโครงสร้างเหล็ก.....	7
2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหัวคคกับน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบ (load) และความโตของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวคค.....	13
2.5 ตัวอย่าง Inhibitors.....	20
2.6 แสดงค่าตัวแปร ANOVA.....	39
2.7 ค่าตัวแปร ANOVA แบบทางเดียว.....	41
2.8 แสดงการทดลองการวิเคราะห์ความแปรปรวน 2 ทาง.....	42
2.9 ค่าตัวแปร ANOVA แบบสองทาง.....	43
4.1 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานก่อนกระบวนการรีดและก่อนกระบวนการอบ.....	59
4.2 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานก่อนกระบวนการอบและหลังกระบวนการรีดที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น ที่ 3 %	60
4.3 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานก่อนกระบวนการอบและหลังกระบวนการรีดที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น ที่ 5 %	60
4.4 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหลังกระบวนการอบที่อุณหภูมิ 850 °c และหลังกระบวนการรีดที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น ที่ 3 %	60
4.5 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหลังกระบวนการอบที่อุณหภูมิ 900 °c และหลังกระบวนการรีดที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น ที่ 3 %	61
4.6 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหลังกระบวนการอบที่อุณหภูมิ 1000 °c และหลังกระบวนการรีดที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น ที่ 3 %	61
4.7 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหลังกระบวนการอบที่อุณหภูมิ 850 °c และหลังกระบวนการรีดที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น ที่ 5 %	61
4.8 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหลังกระบวนการอบที่อุณหภูมิ 900 °c และหลังกระบวนการรีดที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น ที่ 5 %	62
4.9 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหลังกระบวนการอบที่อุณหภูมิ 1000 °c และหลังกระบวนการรีดที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น ที่ 5 %	62

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10 แสดงค่าความของความแข็งแบบบริเนล (Brinell).....	63
4.11 แสดงค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุด Yield Point ของเหล็ก ST 37.....	66
4.12 แสดงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเหล็ก ST 37.....	69
4.13 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของเหล็ก ST 37.....	71
4.14 แสดงการเปรียบเทียบ โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก ST 37 ก่อนการรีดและหลังการรีดเย็น ที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นที่ 3 เปอร์เซ็นต์ และ 5 เปอร์เซ็นต์.....	80
4.15 แสดงการเปรียบเทียบ โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก ST 37 ที่ผ่านกระบวนการรีดเย็นที่ 3 เปอร์เซ็นต์ และผ่านการอบปกติที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	81
4.16 แสดงการเปรียบเทียบ โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก ST 37 ที่ผ่านกระบวนการรีดเย็นที่ 5 เปอร์เซ็นต์ และผ่านการอบปกติที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	82
4.17 แสดงค่าความของความแข็งแบบบริเนล (Brinell).....	83
4.18 แสดงการวิเคราะห์ ANOVA ของค่าความแข็ง.....	84
4.19 แสดงค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุด Yield Point ของเหล็ก ST 37.....	86
4.20 แสดงการวิเคราะห์ ANOVA ค่าความทนต่อแรงดึง.....	86
4.21 แสดงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเหล็ก ST 37.....	88
4.22 แสดงการวิเคราะห์ ANOVA ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น.....	88
4.23 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของเหล็ก ST 37.....	90
4.24 แสดงการวิเคราะห์ ANOVA ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น.....	91

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภูมิสมมูลของเหล็กและคาร์บอนเหล็กกล้าคาร์บอน.....	5
2.2 แสดงลักษณะ โครงสร้างในภาวะเฟสต่างๆ ของเหล็กกล้าคาร์บอน.....	6
2.3 อุณหภูมิสำหรับ ไฮโปยูเทคตอย และ ไฮเปอร์ยูเทคตอยของเหล็ก	8
2.4 สมบัติความเหนียวของการอบอ่อนและการอบปกติของเหล็ก.....	9
2.5 ความต้านแรงดึงของ การอบปกติและ การอบอ่อน.....	9
2.6 จุดครากของการอบปกติ และการอบอ่อน.....	10
2.7 ความแข็งแบบบริเนลล์(HB)ของการอบปกติและการอบอ่อน.....	10
2.8 การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์(HB).....	12
2.9 Oxide scale บนผิวเหล็กแผ่นรีดร้อน.....	16
2.10 ผลของ Coiling temperature ต่อ โครงสร้างของ Oxide scale.....	17
2.11 ชนิดของ Scale Breaker.....	18
2.12 ตัวอย่างของ Pickling line.....	18
2.13 ตัวอย่างการควบคุมความเข้มข้นกรดใน Pickling line.....	19
2.14 กลไกการป้องกันการเกิด Overpickling ด้วย Inhibitor.....	20
2.15 ลักษณะ Cold rolling mill แบบต่างๆ.....	21
2.16 Cold rolling mill.....	22
2.17 Crown และ Thickness deviation.....	23
2.18 ปัญหาเรื่องความเรียบของเหล็ก.....	24
2.19 การเกิด Cold work หลังจากการรีดเย็น.....	24
2.20 การเกิด Restoration process หลังจาก Annealing.....	25
2.21 กระบวนการ Batch annealing.....	26
2.22 ขั้นตอนและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขณะทำ Batch annealing.....	27
2.23 กระบวนการ Continuous annealing.....	28
2.24 ขั้นตอนการทำ Continuous annealing.....	29
2.25 ขั้นตอนการทำ Continuous annealing สำหรับเหล็กชนิดต่างๆ.....	30
2.26 การเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการ Batch annealing และ Continuous annealing.....	30
2.27 ความแตกต่างระหว่างขั้นตอนการทำ Batch annealing และ Continuous annealing.....	31
2.28 ความความแตกต่างของส่วนผสมทางเคมีของเหล็กระหว่างการทำ Batch annealing และ Continuous annealing.....	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.29 การเกิด Yield point elongation.....	32
2.30 การเกิด Strain aging.....	33
2.31 Leveler แบบต่างๆ.....	34
2.32 การเทรซึนหุ้มขึ้นทดสอบ.....	36
2.33 การจัดขึ้นงานด้วยกระดาษทรายสองเบอร์สุดท้าย.....	36
2.34 ผิวแปรรูปก่อนการจัดผิว.....	37
2.35 การใส่สารจับบนงานผ้าสักหลาด.....	38
2.36 ผลลัพธ์ของการศึกษางานวิจัย.....	49
3.1 ตัวอย่างขึ้นงานทดสอบที่ใช้ทดสอบความแข็งและการศึกษาโครงสร้างจุลภาค.....	52
3.2 ตัวอย่างขึ้นงานทดสอบที่ใช้ทดสอบแรงดึง.....	53
3.3 แผนภูมิสมมูลเหล็ก – เหล็กคาร์ไบด์.....	54
3.4 เครื่องทดสอบความแข็งรุ่น ERGOTEST Comp 25.....	55
3.5 เครื่องทดสอบแรงดึงรุ่น Tx 2106 Model Hook.....	56
4.1 กราฟแสดงการทดสอบความแข็งหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นต่างๆ.....	63
4.2 กราฟแสดงการทดสอบความแข็งหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นต่างๆ ตามทฤษฎี.....	64
4.3 กราฟแสดงการทดสอบความแข็งที่อุณหภูมิการอบปกติต่างๆ.....	64
4.4 กราฟแสดงการทดสอบความแข็งที่อุณหภูมิการอบอ่อนต่างๆ จากทฤษฎี.....	65
4.5 กราฟแสดงการทดสอบความทนต่อแรงดึงหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นต่างๆ.....	67
4.6 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การรีดเย็นที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น ต่างๆจากทฤษฎี.....	67
4.7 กราฟการทดสอบการทนต่อแรงดึงที่อุณหภูมิการอบปกติต่าง ๆ.....	68
4.8 อุณหภูมิในการอบปกติที่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น.....	68
4.9 กราฟโมดูลัสความยืดหยุ่นที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น ต่าง ๆ.....	69
4.10 กราฟโมดูลัสความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิการอบปกติ ต่าง ๆ.....	70
4.11 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับค่า โมดูลัสของยังของเหล็กออสเทนไนต์และ ทั้งสแตน.....	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 กราฟเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นต่าง ๆ.....	72
4.13 กราฟเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิอบปกติ ต่าง ๆ.....	72
4.14 อุณหภูมิของการอบอ่อนที่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น และขนาดของเกรน.....	73
4.15 รูปโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนการรีดและก่อนการอบปกติ.....	75
4.16 รูปโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดที่ 3% และก่อนการอบปกติ.....	76
4.17 รูปโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดที่ 5% และก่อนการอบปกติ.....	76
4.18 รูปโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดที่ 3%และหลังการอบปกติที่อุณหภูมิ 850 °c.....	77
4.19 รูปโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดที่ 3% และหลังการอบปกติที่อุณหภูมิ 900 °c.....	77
4.20 รูปโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดที่ 3%และหลังการอบปกติที่อุณหภูมิ 1000 °c.....	78
4.21 รูปโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดที่ 5% และหลังการอบปกติที่อุณหภูมิ 850 °c.....	78
4.22 รูปโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดที่ 5% และหลังการอบปกติที่อุณหภูมิ 900 °c.....	79
4.23 รูปโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดที่ 5% และหลังการอบปกติที่อุณหภูมิ 1000 °c.....	79
5.1 กราฟแสดงการทดสอบความแข็งหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบ.....	93
5.2 กราฟแสดงการทดสอบความแข็งหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นต่างๆ ตามทฤษฎี.....	93
5.3 กราฟแสดงการทดสอบความแข็งที่อุณหภูมิการอบปกติต่างๆที่ได้จากการทดสอบ.....	94
5.4 กราฟแสดงการทดสอบความแข็งที่อุณหภูมิการอบอ่อนต่างๆ จากทฤษฎี.....	94

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.5 กราฟแสดงการทดสอบความทนต่อแรงดึงหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบ.....	95
5.6 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การรีดเย็นที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น ต่างๆจากทฤษฎี.....	95
5.7 กราฟการทดสอบการทนต่อแรงดึงที่อุณหภูมิการอบปกติต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ.....	96
5.8 อุณหภูมิในการอบปกติที่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น.....	96
5.9 กราฟโมดูลัสความยืดหยุ่นที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น ต่าง ๆที่ได้จากการทดสอบ.....	97
5.10 กราฟโมดูลัสความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิการอบปกติ ต่าง ๆที่ได้จากการทดสอบ.....	97
5.11 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับค่าโมดูลัสของยัง ของเหล็ก อคูมิเนียมและทั้งสแตน.....	98
5.12 กราฟเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นต่าง ๆที่ได้จากการทดสอบ.....	98
5.13 กราฟเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิการอบปกติ ต่าง ๆที่ได้จากการทดสอบ.....	99
5.14 อุณหภูมิของการอบอ่อนที่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น และขนาดของเกรน.....	99
5.15 ลักษณะของเกรนที่เกิดขึ้นในเปอร์เซ็นต์การรีดเย็นต่างๆที่ได้จากการทดสอบ.....	100
5.16 ลักษณะของเกรนที่เกิดขึ้นในอุณหภูมิต่างๆที่ได้จากการทดสอบ.....	100

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

เนื่องจากกรรมวิธีที่ใช้ทำกับงานสร้างชิ้นส่วนเครื่องจักรกลโดยทั่วไป ไม่ว่าจะเป็นงานที่ผ่านการขึ้นรูปอ่อนเหล็ก จะถูกเผาที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง จะได้เหล็กที่มีขนาดของเกรนโต สมบัติเชิงกลที่ดีจะเสียไป (ทนแรงดึงและแรงกระแทกได้น้อยลง) งานที่ผ่านการหลอมมาก็เช่นเดียวกัน จะมีขนาดของเกรนโตมีลักษณะเป็นเดนไดรท์ (คล้ายกิ่งไม้) และไม่สม่ำเสมอ มีข้อเสียดังกล่าวที่ควรปรับปรุงก่อนนำไปใช้งาน ยิ่งงานที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น โครงสร้างภายในจะเกิดการบิดเบี้ยวไปตามทิศทางของแรงกระทำเกิดความเครียดภายใน สูญเสียความเหนียวและความแข็งเพิ่มขึ้น ในลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ สิ่งที่เกิดขึ้นในลักษณะที่ไม่ดีเหล่านี้สามารถทำให้หมดไปและปรับปรุงให้ดีขึ้น โดยเฉพาะขนาดเกรนของเนื้อเหล็ก ทำให้เสียดัดและสม่ำเสมอได้ด้วยการทำ นอร์มัลไลซ์ซิง เพื่อที่จะทำให้ได้เหล็กที่มีคุณสมบัติตามที่เราต้องการ และเหมาะสมกับสภาพที่จะนำไปใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาถึงความแตกต่างของสมบัติเชิงกลของเหล็กระหว่างก่อนทำการอบปกติ และหลังการอบปกติ

1.2.2 เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กระหว่างก่อนทำการอบปกติ และหลังการอบปกติ

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

1.3.1 สามารถบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลของเหล็ก ST 37 ระหว่างก่อนทำการอบปกติ และหลังการอบปกติ โดยใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์ความแปรปรวน

1.3.2 สามารถบอกถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก ST 37 ระหว่างก่อนทำการอบปกติ และหลังการอบปกติ

1.3.3 สามารถบอกถึงผลของอุณหภูมิในการอบปกติที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างทางจุลภาค โดยใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์ความแปรปรวน

1.4 เกณฑ์การชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

- 1.4.1 เพื่อให้ทราบถึงสมบัติเชิงกลของเหล็กที่ผ่านการอบปกติ
- 1.4.2 เพื่อเลือกอุณหภูมิที่ใช้ในการอบปกติให้เหมาะสมกับสมบัติเชิงกลของเหล็ก
- 1.4.3 เพื่อบอกความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลและอุณหภูมิในการอบปกติได้

1.5 ขอบเขตการทำโครงการ

- 1.5.1 วัสดุที่ใช้คือเหล็ก ST 37
- 1.5.2 เฟอร์เซ็นต์การรีดเย็น (Cold Work) คือ 3% และ 5%
- 1.5.3 อุณหภูมิที่ใช้ในการอบปกติ (Normalizing) คือ 850 °C, 900 °C และ 1,000 °C
- 1.5.4 สมบัติเชิงกลที่ศึกษา ดังนี้
 - 1.5.4.1 ความแข็ง (Hardness)
 - 1.5.4.2 ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength)
 - 1.5.4.3 โมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)
 - 1.5.4.4 เฟอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น (% Elongation)
- 1.5.5 ตรวจสอบ โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก ST 37 ที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ

1.6 สถานที่ในการดำเนินการวิจัย

- 1.6.1 อาคารปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- 1.6.2 อาคารปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- 1.6.3 สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร
- 1.6.4 ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- 1.6.5 ห้องบริการอินเทอร์เน็ต อาคารเรียนรวม คณะวิศวกรรมศาสตร์

1.7 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย

ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม พ.ศ.2552 – เมษายน พ.ศ.2553

1.8 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ (Gantt Chart)

ลำดับ	การดำเนินงาน	ก.ค.	ค.ค.	พ.ค.	เม.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1	ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	■	■								
2	ออกแบบการทดลอง			■	■	■					
3	ทดสอบสมบัติเชิงกลและศึกษาโครงสร้างจุลภาค						■	■	■		
4	วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง									■	
5	จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์										■

1.9 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ

- 1.9.1. ค่าจ้างทำชิ้นงานทดสอบแรงดึง 4,000 บาท
- 1.9.2. ค่าเรซินและอุปกรณ์หล่อเรซิน 500 บาท
- 1.9.3. ค่าถ่ายเอกสารและทำรูปเล่ม 1,000 บาท
- รวมเป็นเงิน 5,500 บาท (ห้าพันห้าร้อยบาทถ้วน)

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 ชนิดของเหล็กกล้า

เหล็กกล้าแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel)

เหล็กกล้าผสม (Alloy Steel)

เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel) เป็นเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของคาร์บอนเป็นหลักแต่จะมีสารอื่นผสมอยู่ด้วยตั้งแต่กระบวนการถลุงสินแร่เหล็กในเบื้องต้น เช่น ซาตุซิลิคอน ฟอสฟอรัส แมงกานีส และกำมะถัน เหล็กกล้าคาร์บอน

2.1.1 เหล็กกล้าชนิดนี้สามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานเป็น 2 อย่าง คือ

2.1.1.1 เหล็กที่นำไปใช้งานได้เลยไม่ต้องผ่านกรรมวิธีปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยใช้ความร้อนเช่น ST 37 หมายถึง เหล็กกล้าคาร์บอนที่สามารถทนแรงดึงได้สูงสุด 37 N/mm^2 สำหรับเหล็กประเภทนี้ ในกรณีที่มีคุณสมบัติเดียวกันอาจจะเรียกได้ไม่เหมือนกัน เช่น เหล็กที่มีคาร์บอน (C) 0.2% และมีความสามารถในการทนแรงดึงสูงสุด 37 N/mm^2 จะสามารถใช้สัญลักษณ์แทนชนิดของเหล็กได้ 2 ลักษณะ คือ “St 37” หรือ “C 20” ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการที่จะเลือกนำเหล็กไปใช้งานในแต่ละจุดประสงค์ตามต้องการ

ตารางที่ 2.1 สมบัติเชิงกลของเหล็ก ST 37

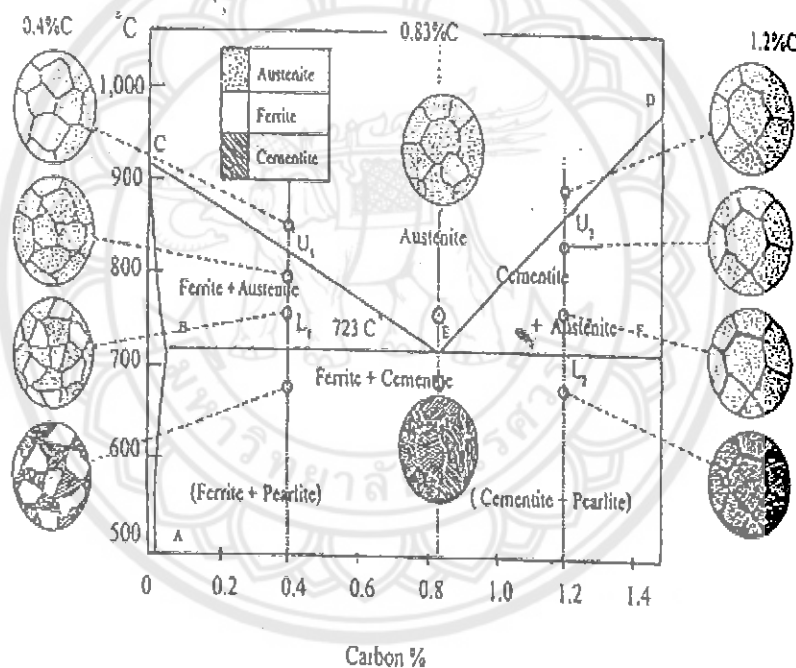
สมบัติเชิงกลของเหล็ก ST 37	คุณสมบัติ
เปอร์เซ็นต์คาร์บอน	0.2
ทนต่อแรงดึง	$360 - 510 \text{ N/mm}^2$
ทนต่อแรงดึงที่จุดล้าตัว	235 N/mm^2
อัตราการยืดตัว	21-26 %

ที่มา: ร.ศ บรรจง ศรีนิล(2524) “ตารางโลหะ” สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (หน้า 115).

2.1.1.2 เหล็กที่ต้องนำไปผ่านการปรับปรุงสมบัติโดยใช้ความร้อนก่อนที่จะนำไปใช้งาน เหล็กชนิดนี้จะนำหน้าด้วยอักษร C และตามด้วยตัวเลขที่แสดงปริมาณเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอน เช่น C25 หมายถึง เหล็กกล้าคาร์บอนที่มีคาร์บอนประสมอยู่ 0.25 เปอร์เซ็นต์

2.1.2 แบ่งตามปริมาณธาตุคาร์บอนส่วนผสมได้ 3 ชนิด

แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ในส่วนอื่นท่านสามารถศึกษาได้จากหนังสืออ้างอิง เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) มีคาร์บอนในส่วนผสมไม่เกินกว่า 0.30 เปอร์เซ็นต์ มีความเหนียว ไม่แข็งแรงมากนัก สามารถนำไป กลึง ไส ตัด เจาะ ได้ง่าย ใช้ทำโครงสร้างทำลวด สกรู น็อต สลักเกลียว ทำแผ่นเหล็ก โซ่ ตัวถังรถยนต์ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำไม่เหมาะสำหรับการจะนำชิ้นงานไปชุบแข็งเพราะมีปริมาณคาร์บอนต่ำ ต้องนำไปผ่านกรรมวิธีเพิ่มคาร์บอนที่ผิวงานก่อน



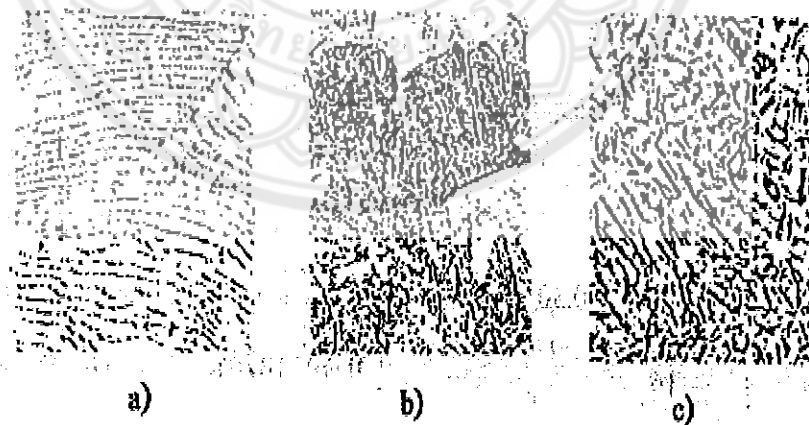
รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลของเหล็กและคาร์บอนเหล็กกล้าคาร์บอน

ที่มา : ไพพรรณ สันติสุข (2539). (หน้า 21)

รูปที่ 2.1 การเกิดเฟสของเหล็กกล้าคาร์บอนเนื่องจากเหล็กและคาร์บอนในอัตราส่วนผสมและอุณหภูมิต่างๆ จะปรากฏสภาวะการณดังนี้

ที่ปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.83 และอุณหภูมิ 723 องศาเซลเซียส เป็นจุดยูเทคทอยด์ (Eutectoid) หรือ ออสเทนไนต์ (Austenite) เป็นเฟสที่มีโครงสร้างเป็น Face Centered Cubic (FCC)

และเป็นสารละลายของแข็ง (Solid Solution) ที่อุณหภูมิสูง ถ้าทำให้เย็นลงจะเปลี่ยนเป็นเฟอร์ไรต์ (Ferrite) ที่มีโครงสร้างเป็น Body Centered Cubic (BCC) และเป็นสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 910 องศาเซลเซียส จะมีคาร์บอนละลายอยู่ไม่เกินร้อยละ 0.03 คาร์บอนของส่วนที่เหลือจะแยกตัวเป็นคาร์ไบด์ (Carbide) หรือซีเมนไทต์ (Cementite) ตำแหน่งจุด E บนเทคทอยด์ CED เป็นอุณหภูมิวิกฤตช่วงสูง (Upper Critical Temperature) และ BEF เป็นอุณหภูมิวิกฤตช่วงต่ำ (Lower Critical Temperature) ชนิดของเฟสและปริมาณของแต่ละเฟส สามารถหาได้จากแผนภูมิสำหรับเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่างๆ และที่อุณหภูมิต่างๆ ถ้าเหล็กมีปริมาณคาร์บอนสูงกว่าร้อยละ 0.83 เรียกว่า เหล็กไฮโปยูเทคทอยด์ (Hypereutectoid Steels) เหล็กที่มีส่วนประกอบยูเทคทอยด์ คือ คาร์บอนร้อยละ 0.83 ที่อุณหภูมิในช่วงออสเทนไนต์ ถ้าทำให้เย็นถึงจุดยูเทคทอยด์ ออสเทนไนต์จะเปลี่ยนเป็นเฟอร์ไรต์และซีเมนไทต์ แต่การเรียงตัวเป็นแบบสลับ (Lamella) เรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า เฟอร์ไลต์ (Pearlite) ซึ่งก็คือ เฟอร์ไรต์และซีเมนไต์นั่นเอง ด้านไฮโปยูเทคทอยด์ เริ่มจากเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.4 ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จะมีโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ทั้งหมด เมื่ออุณหภูมิวิกฤตช่วงสูงเฟอร์ไรต์จะเกิดขึ้นตามขอบเกรนก่อน และจะมีปริมาณมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 723 องศาเซลเซียส ออสเทนไนต์ที่เหลือจะเปลี่ยนเป็น เฟอร์ไลต์ เหล็กที่มีส่วนประกอบไฮเปอร์ยูเทคทอยด์ เช่น เหล็กที่มีคาร์บอนร้อยละ 1.2 ถ้าทำให้เย็นลงจากเฟสออสเทนไนต์ เมื่อถึงอุณหภูมิวิกฤตช่วงต่ำ ออสเทนไนต์ที่คงเหลือจะเปลี่ยนแปลงเป็นเฟอร์ไลต์ ที่อุณหภูมิห้อง โครงสร้างจึงเป็นเฟสเฟอร์ไลต์และซีเมนไทต์



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะโครงสร้างในภาวะเฟสต่างๆ ของเหล็กกล้าคาร์บอน

- a) การเรียงตัวเป็นชั้นๆของเฟอร์ไลต์ b) การเกิดซีเมนไทต์ตามแนวขอบเกรนของเฟอร์ไลต์
c) มาเทนไซต์รูปเข็มในเกรนของออสเทนไนต์

ที่มา : ไพพรรณ สันติสุข (2539). (หน้า 21)

ถ้าอัตราการเย็นตัวเร็วมาก เวลาไม่เพียงพอที่จะเข้าสู่สภาพสมดุล เช่น ในการทำการชุบแข็ง จะได้โครงสร้างที่ไม่พบในสภาพสมดุล เป็นเฟสไม่สมดุล เช่น มาร์เทนไซต์ เฟสมาร์เทนไซต์นี้จะไม่ปรากฏอยู่ในแผนภาพสมดุล เนื่องจากอัตราการเย็นตัวเป็นไปอย่างรวดเร็ว มาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นรูเข็ม ในขอบเกรนของออสเทนไนต์เดิม และมีความเค้นภายในสูงมาก จะแข็งมากแต่เปราะ ใช้ในงานเฉพาะที่ต้องการความแข็งแรงมาก แต่เนื่องจากความเปราะของมาร์เทนไซต์ หลังจากทำการชุบแข็งแล้วจำเป็นต้องทำการอบคืนตัว อีกครั้งเพื่อช่วยในการลดความเค้นภายใน เนื่องจากการอบคืนตัวเป็นกระบวนการให้ความร้อนในระยะเวลาหนึ่ง เหล็กจะพยายามเข้าสู่สภาพสมดุล แต่อุณหภูมิยังไม่สูงมากและเวลาไม่นานพอ ฉะนั้นจะไม่สามารถเข้าสู่สภาพสมดุลเต็มที่ เป็นผลให้เหล็กที่เปราะและแข็งนั้นมีสภาพเหนียวขึ้น แต่ความแข็งแรงจะลดลงบ้าง ทำให้การใช้งานดีขึ้นกว่าเป็นมาร์เทนไซต์จากการทำการชุบแข็ง การทำการอบคืนตัว

ตารางที่ 2.2 แสดงการใช้งานของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

ชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอน	ปริมาณคาร์บอน (%)	ลักษณะการใช้งาน
คาร์บอนต่ำ	0.05 – 0.15	ลวด, ตะปู, ท่อ, เหล็กแผ่น, หมุดย้ำ เหล็กก่อสร้าง, สกรู, เหล็กแผ่น
คาร์บอนต่ำ	0.01 – 0.30	สำหรับแผ่นเหล็กวิลาส, เกียร์, เฟลา, คาน แกนเพลตาต่างๆ

ที่มา: ไพพรรณ สันติสุข(2539). (หน้า 24).

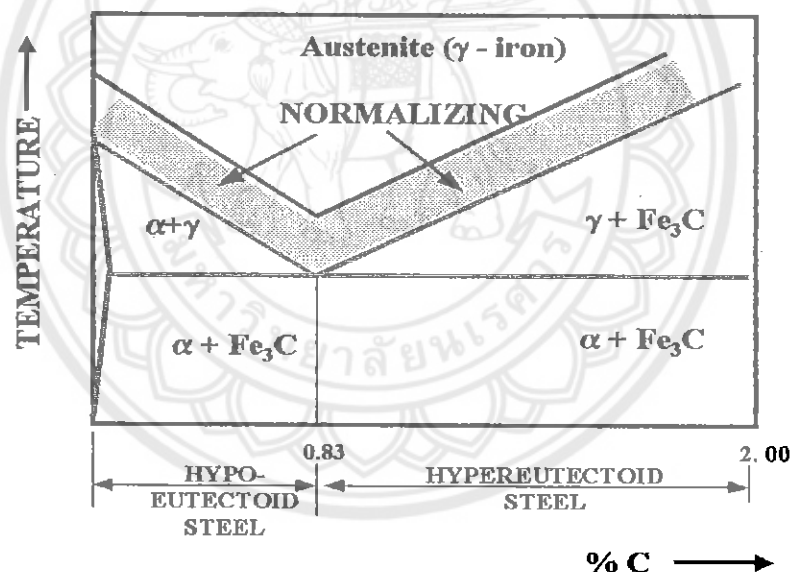
ตารางที่ 2.3 แสดงความสามารถละลายธาตุคาร์บอนใน โครงสร้างเหล็ก

ประเภท โครงสร้าง	ความสามารถละลายธาตุคาร์บอน (%)
เหล็ก (Iron)	0.008
เฟอร์ไรต์ (Ferrite)	0.025
เพิร์ไลต์ (Pearlite)	0.800
ออสเทนไนต์ (Austenite)	2.000
ซีเมนไตต์ (Cementite)	6.670

ที่มา: ประเสริฐ มหาศรานนท์. ม.ป.ป., (หน้า 118).

2.2 การอบปกติ (Normalizing)

การอบปกติเป็นการอบเพื่อปรับปรุงความเหนียวโดยขนาดลดขนาดของเม็ดเกรนของเหล็ก (Grain size) เพื่อให้สมบัติของเหล็กสม่ำเสมอ และในขณะเดียวกันก็ช่วยในการลดความเครียดภายในด้วย โดยทั่วไปเหล็กที่ผ่านการหล่อ(Casting)หรือการรีดขึ้นรูปมามักจะมีความแข็งหรือความเหนียวไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งแท่ง จึงจำเป็นต้องนำมาทำ นอร์มัลไลซ์ซึ่ง โดยการเผาเหล็กให้ร้อนจนกลายเป็นออสเทนไนท์ที่อุณหภูมิเหนือเส้น A_3 ประมาณ 50 องศาเซลเซียส หลังจากทิ้งไว้จนอุณหภูมิเท่ากันหมดทุกจุดตลอดภายในใจกลางด้วย จากนั้นจึงเอาเหล็กออกจากเตาทิ้งให้เย็นอากาศธรรมดา การปล่อยให้เหล็กเย็นในอากาศนั้นอัตราการเย็นตัวของเหล็กจะเร็วกว่าการทำแอนเนียร์ริง ดังนั้นเม็ดเกรนของเหล็กจะมีขนาดเล็กกว่าทำให้เหล็กมีความเหนียวสมบัติสม่ำเสมอในการอบปกติของเหล็กเป็นการโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 100 องศาฟาเรนไฮด์เหนือ UCT (อุณหภูมิวิกฤต)แล้วปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง การอบปกติสามารถจะปรับปรุงใช้เหนือเส้น UCT ได้ทั้งไฮโปยูเทคตอยและไฮเปอร์ยูเทคตอยของเหล็ก ดังรูปที่ 2.3 แสดงการอบปกติอุณหภูมิ



รูปที่ 2.3 อุณหภูมิสำหรับ ไฮโปยูเทคตอย และ ไฮเปอร์ยูเทคตอยของเหล็ก

ที่มา : <http://info.lu.farmingdale.edu/depts/met/met205/normalizing.html> . (2552).

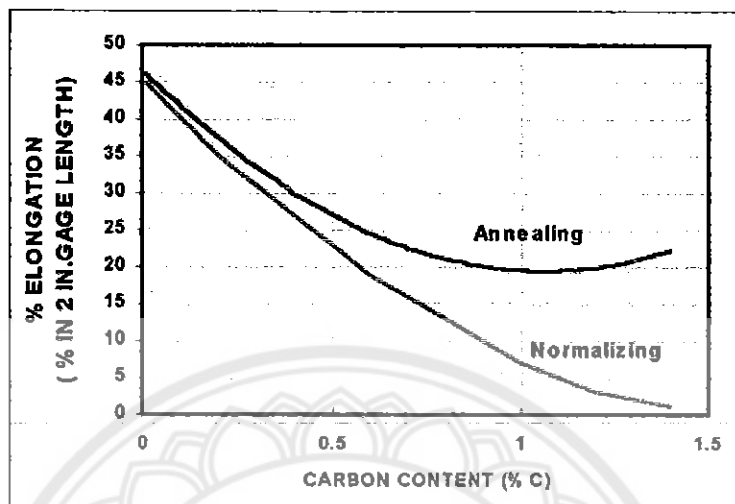
จุดมุ่งหมายของการอบแบบปกติ คือ

เพื่อให้เหล็กมีความแข็งและความแข็งแรงดีขึ้นกว่าการอบอ่อน

เพื่อช่วยในการเพิ่มความสามารถในการกลึง ตัด ไสของโลหะ (Machinability)

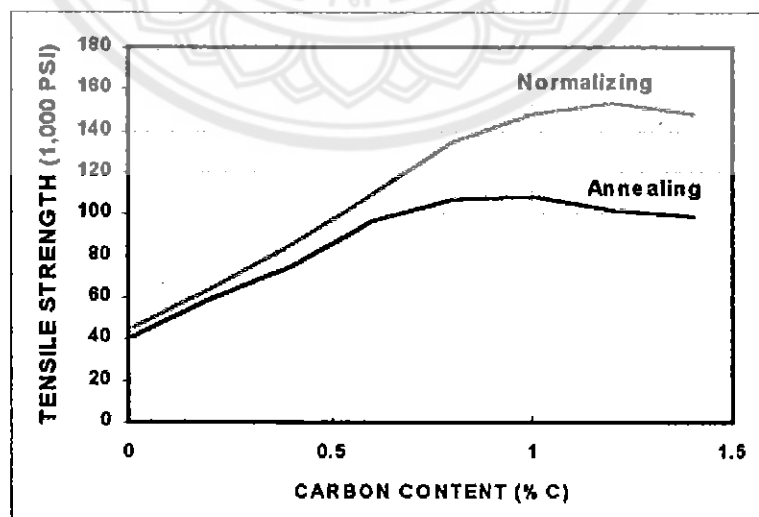
เพื่อให้โครงสร้างมีเกรนที่ละเอียดขึ้น โดยเฉพาะกับเหล็กที่มีค่าคาร์บอนต่ำ

รูปที่ 2.4, 2.5, 2.6 และ 2.7 แสดงค่า Ductility, Tensile strength, Hardness and Yield point ของการอบปกติ และการอบอ่อน



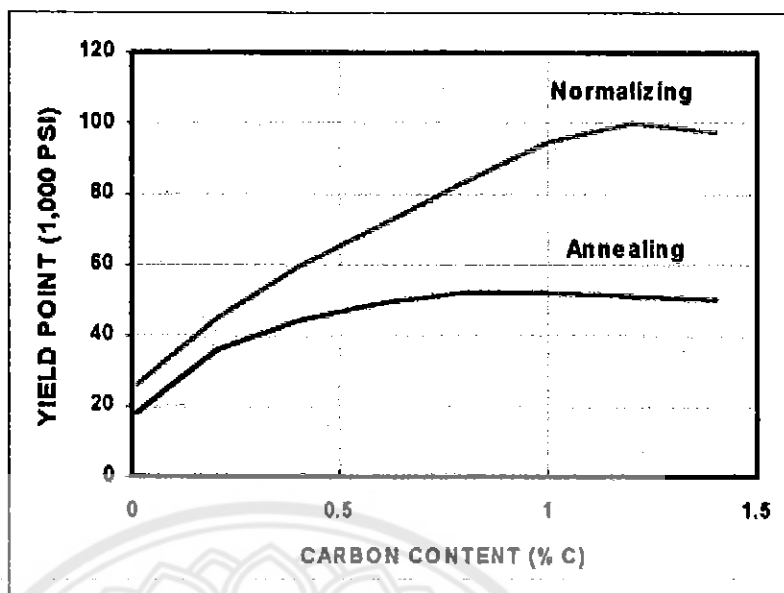
รูปที่ 2.4 สมบัติความเหนียวของการอบอ่อนและการอบปกติของเหล็ก
ที่มา : <http://info.lu.farmingdale.edu/depts/met/met205/normalizing.html> . (2552)

รูปที่ 2.4 การอบอ่อนจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นที่ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมากกว่าการอบแบบปกติที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นที่ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.5 ความต้านแรงดึงของ การอบปกติและ การอบอ่อน

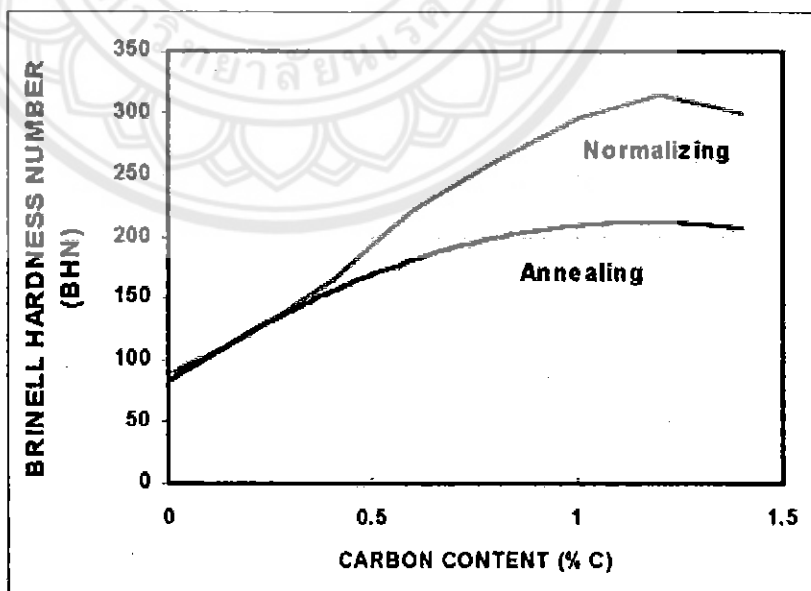
ที่มา : <http://info.lu.farmingdale.edu/depts/met/met205/normalizing.html>. (2552).



รูปที่ 2.6 จุดครากของการอบปกติ และการอบอ่อน

ที่มา : <http://info.lu.farmingdale.edu/depts/met/met205/normalizing.html>. (2552).

รูปที่ 2.5 และ รูปที่ 2.6 แสดงความต้านทานแรงดึงและจุดครากการอบปกติและการอบอ่อน โดยที่เหล็กอบปกติ จะมีค่าสูงกว่า เหล็กที่อบอ่อน



รูปที่ 2.7 ความแข็งแบบบริเนลล์(HB) ของการอบปกติและการอบอ่อน

ที่มา : <http://info.lu.farmingdale.edu/depts/met/met205/normalizing.htm> .(2552).

จากรูปที่ 2.7 เหล็กที่มีค่าเปอร์เซ็นต์คาร์บอนต่ำหรือปานกลาง จะสามารถรักษาระดับค่าความแข็งได้เมื่อนำมาทำการอบปกติหรืออบอ่อน อย่างไรก็ตามเมื่อนำเหล็กที่เปอร์เซ็นต์คาร์บอนสูง มาผ่านกระบวนการอบปกติจะรักษาระดับความแข็งสูงกว่าที่อบอ่อน

2.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness test)

การวัดหาความแข็งเป็นการทดสอบที่ง่ายและผู้ทดสอบไม่ต้องมีความชำนาญมากนัก เพราะเครื่องที่ใช้ทดสอบความแข็งจะช่วยให้สะดวกและจะทราบผลได้อย่างรวดเร็ว การวัดค่าความแข็งมีหลายวิธี ได้แก่ เครื่องทดสอบแบบบริเนลล์ (Brinell tester), แบบร็อกเวลล์ (Rockwell), แบบวิกเกอร์ (Vicker) และแบบชอร์ (Shore) แต่ในที่นี้จะขอกล่าวโดยละเอียดเฉพาะเครื่องทดสอบแบบบริเนลล์

2.3.1 ชนิดของการทดสอบความแข็ง

ชนิดของการทดสอบความแข็งจะมีความหมายในทางวิศวกรรมคือ เป็นความแข็งของวัสดุต่างๆ ที่จะนำมาวัดหาความแข็งได้โดยความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือความต้านทานต่อการขีดข่วน ความต้านทานต่อการเกิดการเสียดสี หลักในการปฏิบัติ เราสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

2.3.1.1 ชนิดที่ใช้น้ำหนักกดลงที่และใช้หัวกด (Indenter) เป็นตัววัดหาความแข็ง ได้แก่ แบบบริเนลล์, แบบร็อกเวลล์, และแบบวิกเตอร์ ซึ่งเป็นวิธีการวัดเพื่อหารอยบุ่ม หาความลึกบนผิวหน้าของชิ้นงาน

2.3.1.2 ชนิดที่ใช้น้ำหนักกดลงไม่คงที่ เช่น เครื่องทดสอบความแข็งแบบมาร์เทนส์ (Martens hardness)

2.3.1.3 ชนิดที่ใช้แรงเคลื่อนที่โดยใช้แรงกระแทกชิ้นงานทดสอบ เช่น แบบชอร์

ก. การทดสอบโดยใช้ลูกตุ้มแกว่ง เมื่อไปกระทบชิ้นงานให้แตกหักแล้วสะท้อนกลับมาและวัดเป็นมุม (องศา) ได้แก่ การทดสอบแบบเจอโรสโคป (Juroscope hardness), แบบชาร์ปี และแบบไอซอด

ข. ชนิดที่ใช้วิธีขีดข่วนลงบนชิ้นงานคือ แบบสแครตช์ (Scratch hardness) แบบมาร์เทนส์สแครตช์ (Martens Scratch hardness)

2.3.2 การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์

เมื่อปี พ.ศ. 2443 เจ. เอ. บริเนลล์ (J.A. Brinell) ได้กำหนดวิธีการทดสอบค่าความแข็งแบบ บริเนลล์ขึ้น และเป็นที่นิยมกันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

2.3.2.1 หลักการหาค่าความแข็ง และการวัดความแข็งแบบบริเนลล์การหาค่าความแข็งแบบบริเนลล์โดยการคำนวณ จะใช้สูตรดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 HB &= \frac{\text{น้ำหนักที่ใช้ทดสอบ (kg)}}{\text{พื้นที่ผิวหน้ารอยบุ๋ม}} \\
 &= \frac{P}{(\pi D/2) \sqrt{D - (D^2 - d^2)}} \\
 &= \frac{2P}{(\pi D) \sqrt{D - (D^2 - d^2)}} \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

กำหนดให้ $\pi = 22/7$ (หรือ 3.1416)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกด (mm)

P = น้ำหนักกดที่กระทำต่อวัตถุ (kg)

d = ความโตของรอยบุ๋ม (mm)

ในการคำนวณค่าความแข็งแบบบริเนลล์ ถ้าค่าที่ได้ออกมามีจุดทศนิยมให้ตัดจุดทศนิยมนั้นออก เช่น ค่าความแข็งบริเนลล์ 53.5 ให้เขียนเป็น ค่าความแข็งบริเนลล์ 53 เท่านั้น และถ้าค่าความแข็งที่ได้ออกมามีจุดทศนิยมมากกว่า 2 ตัว ให้ตัดออก 1 ตัวคงไว้เพียง 1 ตัวเท่านั้น เช่น ได้ค่าความแข็ง 35.645 ให้ตอบเป็นค่าความแข็งแบบบริเนลล์ 35.6 เท่านั้น



รูปที่ 2.8 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล(HB)

ที่มา : ชาญวุฒิ ตั้งจิตวิทยาและสาโรจ ฐิติเกียรติพงศ์(2553). วัสดุในงานวิศวกรรม.(หน้า 118)

2.3.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวคกับน้ำหนักและความโตของเส้นผ่านศูนย์กลางตัวค

ตารางที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหัวคกับน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบ (load) และความโตของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวค

เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวค (mm)	น้ำหนักที่ใช้ (kg)	โลหะที่ใช้	สัญลักษณ์
5	750	วัสดุทดสอบแข็งมาก	(5/750)
10	500	อลูมิเนียม แมกนีเซียม	(10/500)
10	1000	โลหะผสมทองแดงผสม	(10/1000)
10	3000	เหล็กกล้าที่ใช้ในโรงงาน อุตสาหกรรม	(10/3000)

ที่มา : จิตรชัย วัชรชัย โสภณศิริและนายชาญชัย ทรัพย์ผลไทย.(2548).การจัดทำตัวอย่างอ้างอิงโลหะ
วิทยา.ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร(หน้า 23)

2.3.3 ข้อควรระวังในการทดสอบ

2.3.3.1 ผิวหน้าของชิ้นงานทดสอบต้องเรียบสม่ำเสมอ

2.3.3.2 หลังจากที่ถูกชิ้นงานให้เป็นรอยบวมแล้ว เวลาที่จะวัดความโตของรอยบวมจะต้องใช้กล้องขยายส่องดู ด้านในของกล้องจะมีสเกล เอสเกลด้านใดด้านหนึ่งให้อยู่ที่ 0 แล้วทำการวัดหาค่าความโตทั้งทางด้านแนวนอนและแนวตั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

2.3.3.3 ความหนาของชิ้นงานที่จะนำมาทดสอบ ต้องมีพื้นที่มากกว่าความลึกรอยกด ประมาณ 10 เท่า

2.3.3.4 พื้นที่ความกว้างและความยาวของชิ้นงานทดสอบจะต้องโตและยาวประมาณ 2 เท่าของความโตของหัวค

2.3.3.5 เมื่อทำการกดหาความแข็งเป็นรอยบวมแล้วและต้องการทดสอบอีกครั้ง ใก้ๆ จุดเดิม ต้องให้ห่างกว่าจุดแรกมากกว่า 4 เท่า ของความโตหัวค และต้องห่างจากจุดแรกมากกว่า 2.5 เท่าของความโตหัวค

2.4 การทดสอบความต้านแรงดึง (Tensile Test)

การทดสอบแรงดึง คือ การทดสอบแรงดึงใช้สำหรับการประเมินความแข็งแรงของโลหะหรือโลหะผสมด้วยการใช้วิธีดึงจนขาดในช่วงเวลาสั้นๆด้วยอัตราคงที่ ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะมีลักษณะแตกต่างกันไปสำหรับโลหะอาจทำเป็นแผ่นหรืออาจทำเป็นแท่ง โดยข้อมูลที่ได้คือกราฟระหว่างความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรมหรือแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงาน ข้อมูลสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงและแผนภาพความเค้นและความเครียด ทางวิศวกรรมมีดังนี้

2.4.1 โมดูลัสของความเป็นอีลาสติก (Modulus of elasticity)

โมดูลัสของความเป็นอีลาสติก เป็นค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุ เมื่อได้รับแรงกระทำสามารถหาได้จากความชันของกราฟความเค้นและความเครียดของวัสดุในระยะแรกที่ยังแสดงสมบัติยืดหยุ่นอยู่ สำหรับโลหะจะมีค่าน้อยกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ ของความเครียด โดยที่โมดูลัส ของความเป็นอีลาสติกนี้เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของพันธะ (Bond strength) ระหว่างอะตอม ของโลหะหรือของโลหะผสม โลหะที่มีค่าโมดูลัสของความเป็นอีลาสติกสูงจะแกร่ง ไม่เปลี่ยนรูปร่างง่าย เช่น เหล็กกล้ามีค่าโมดูลัสของการยืดตัว 30×10^6 psi. (207 Gpa) ในขณะที่โลหะอลูมิเนียมมีค่าต่ำกว่าประมาณ $10 - 11 \times 10^6$ psi (69 - 76 Gpa) โปรดสังเกตว่าในช่วงความยืดตัวของแผนภาพความเค้นและความเครียดค่าโมดูลัสจะ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น

2.4.2 ความเค้นและความเครียด ณ จุดคราก (Stress and strain at yield)

ความเค้นและความเครียด ณ จุดคราก เป็นค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุ ณ จุดที่เปลี่ยน สมบัติจากอีลาสติกไปเป็นพลาสติกหรืออีกนัยหนึ่งหมายความว่าวัสดุนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง อย่างถาวรเมื่อความเค้นหรือความเครียดมีค่ามากกว่านี้ สำหรับวัสดุที่แสดงจุดครากอย่างชัดเจนเราจะ สังเกตได้จากที่กราฟมีค่าความชันเท่ากับศูนย์ ส่วนในกรณีที่วัสดุไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจนนั้น อาจกำหนดให้ใช้ 0.2 เปอร์เซ็นต์ หรือ 0.1 เปอร์เซ็นต์ ของ Plastic strain ที่เกิดขึ้นในแผนภาพความเค้นและความเครียด เป็นค่ากำหนดในการหาจุดคราก อาจเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า Offset yield

2.4.3 ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength)

ความต้านทานแรงดึงสูงสุด คือ ความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ พิจารณาจากความเค้นทางวิศวกรรม สูงสุดในแผนภาพความเค้นและความเครียดค่านี้ไม่ค่อยใช้มากในงานออกแบบทางวิศวกรรมก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับพวกโลหะอ่อน (Ductile alloy) เนื่องจากมีการการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรขึ้น อย่างมากก่อนถึงค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด แต่อย่างไรก็ตามค่าความต้านทาน

แรงดึงสูงสุดนี้ ยังสามารถบ่งชี้ได้ว่าโลหะนั้นมีความสมบูรณ์หรือไม่ถ้าโลหะนั้น ไม่สมบูรณ์ เช่น มีรูพรุน (Porosity) จะทำให้ค่า Strength ลดลง

2.4.4 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent elongation (%Strain))

เปอร์เซ็นต์การยืดตัว คือ ปริมาณเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานตัวอย่าง ภายใต้แรงดึง เมื่อเทียบกับระยะการวัด (Gage length) ของชิ้นงานทดสอบ และยังเป็นค่าที่ใช้บอกถึงความอ่อน (Ductile) ของวัสดุ โดยทั่วไปโลหะยิ่งอ่อนยิ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดมากแสดงว่าโลหะนั้นเปลี่ยนรูปมาก สำหรับโลหะอลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่เป็นแผ่นหนา 0.062 นิ้ว หรือ 1.6 mm จะมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงถึง 35 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าเป็นโลหะอลูมิเนียมผสม (ความแข็งแรงสูงกว่า) 7075-T6 ที่หนาเท่ากัน จะมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว เพียง 11 เปอร์เซ็นต์ เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดที่ขาดมีความสำคัญทางด้านวิศวกรรมมาก เพราะนอกจากจะทำให้เราทราบว่าโลหะนั้นอ่อนเพียงใดแล้วยังจะเป็นดัชนีที่ชี้ให้เห็นว่าโลหะนั้นมีคุณภาพอย่างไร

2.5 การขึ้นรูปแบบเย็นและกรรมวิธีการขึ้นรูปแบบเย็น

การขึ้นรูปแบบเย็น การขึ้นรูปแบบเย็น (Cold Working) หมายถึง ขบวนการรีดขึ้นรูปเพื่อให้วัสดุหรือโลหะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ชนิดถาวรในที่ ๆ อุณหภูมิต่ำ ๆ ทั้งนี้โดยไม่ทำให้เกิดผลึกใหม่ขึ้น ขบวนการขึ้นรูปแบบเย็น จะประกอบไปด้วย

2.5.1 การรีดเย็น (Cold Rolling)

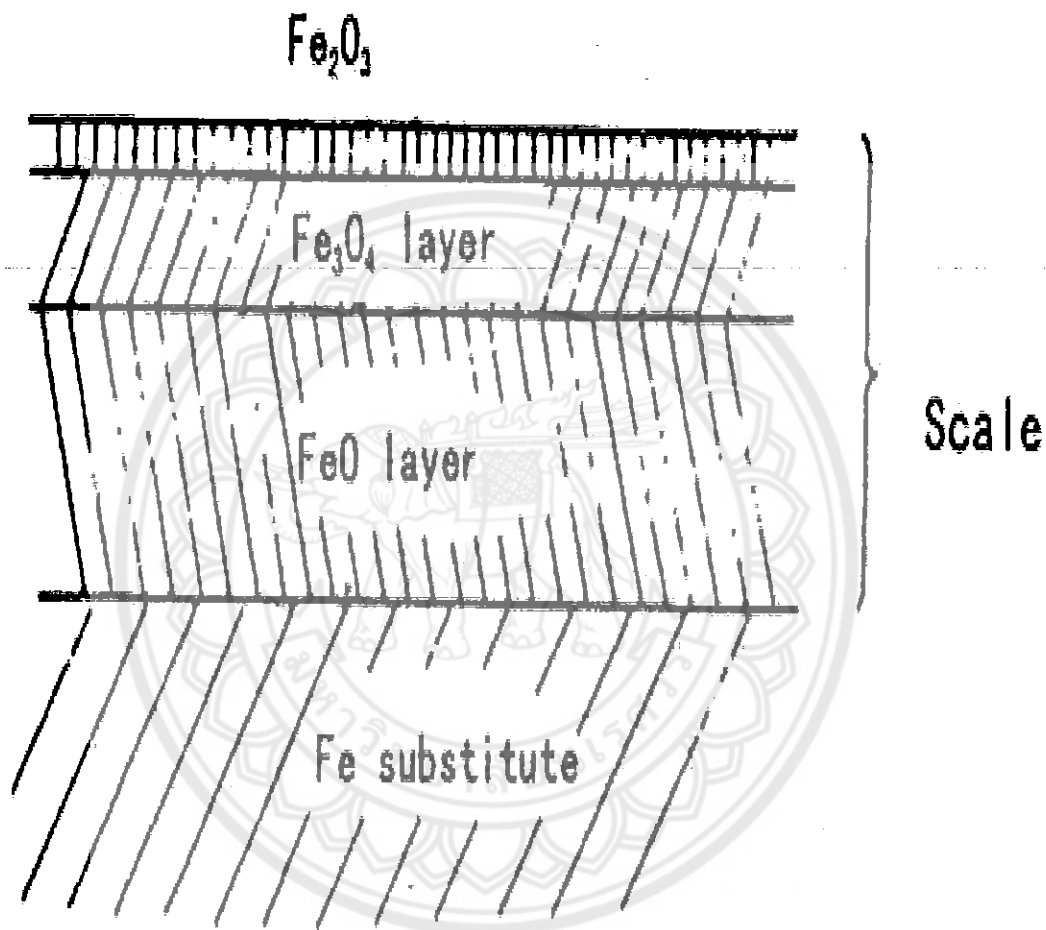
เป็นการรีดในลักษณะเช่นเดียวกับ Hot Rolling คือ อาศัยลูกรีด (Roll) สองตัวหมุนในทิศทางต่างกัน ลูกรีดแต่ละตัวจะมีร่องเป็นลักษณะต่าง ๆ ตามที่ต้องการ เอาโลหะที่เผาจนร้อนแดงส่งผ่านให้ลูกรีดตามร่องต่าง ๆ โลหะจะถูกบีบให้มีรูปร่างตามช่องว่างระหว่างลูกรีดและเคลื่อนที่ออกมาอีกด้านหนึ่ง แต่จะทำในขั้นสุดท้ายเท่านั้น (เฉพาะใน Flat Products) เพื่อให้ได้โลหะมีขนาดแน่นอนและผิวเรียบ เช่น การรีดเหล็ก ทองเหลืองและอะลูมิเนียม ที่มีขายอยู่ในท้องตลาดทั่วไป จะสังเกตได้จากโลหะพวกนี้จะมีผิวเรียบเป็นมัน

ข้อจำกัดสำหรับการใช้งานเหล็กแผ่นรีดร้อน คือ ความหนาและผิวที่ถูกปกคลุมด้วย Oxide scale ซึ่งเกิดในช่วงที่เหล็กออกจาก Finishing Mill และปล่อยให้เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง ทำให้เหล็กแผ่นรีดร้อนไม่สามารถนำไปใช้กับงานที่ต้องการความหนาน้อย แต่ต้องการสภาพผิวที่สวยงาม ดังนั้นเหล็กแผ่นรีดร้อนจึงต้ององถูกนำไปผ่านกระบวนการรีดเย็นเพื่อลดความหนา และการรีดเย็นจะทำให้ผิวของเหล็กมีความสวยงาม เนื่องจากเป็นการรีดที่อุณหภูมิห้องซึ่งจะเกิด Oxide scale ใด้ยาก กระบวนการรีดเย็นจะเริ่มจากการกำจัด Oxide scale ออกจากผิวเหล็ก รีดร้อนก่อน โดย Oxide scale ที่ปกคลุมผิวของเหล็กแผ่นรีดร้อนจะประกอบด้วย 3 layers (ดังรูปที่ 2.9) คือ

layers 1. FeO (Wustite) เป็นชั้นในสุดที่สัมผัสกับผิวเหล็ก และมีความหนามากสุด

layers 2. Fe_3O_4 (Magnetite) จะเป็นชั้นตรงกลาง มีความหนาปานกลาง และเป็นสีเทา
ดำ

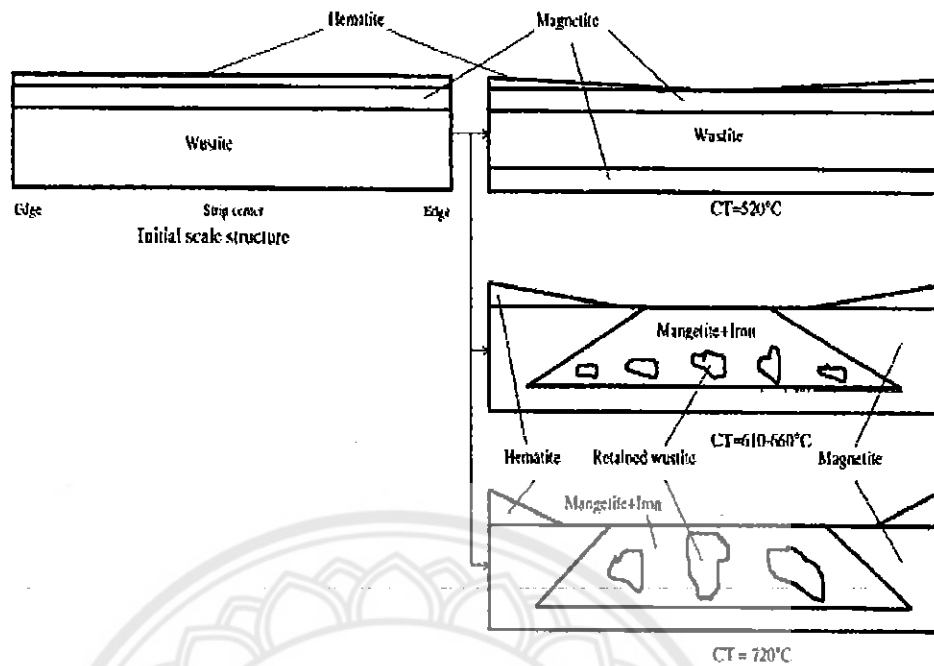
layers 3. Fe_2O_3 (Hematite) จะเป็นชั้นนอกสุดที่สัมผัสกับบรรยากาศ มีความหนา
น้อยสุด และเป็นสีแดง



รูปที่ 2.9 Oxide scale บนผิวเหล็กแผ่นรีดร้อน

ที่มา : Cold Rolled Steel Sheet, The Iron and Steel Institute of Japan. (pp. 23)

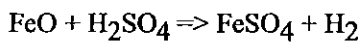
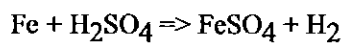
ความหนาของแต่ละ Layer จะขึ้นกับอุณหภูมิและบรรยากาศที่ม้วนเหล็ก ตลอดจน
ตำแหน่งบน Coil โดยส่วนมากความหนารวมของ Oxide scale จะอยู่ที่ 8-12 μm โดยที่ขอบของ
เหล็กจะมี Oxide scale หนากว่าส่วนอื่น และจะมีสัดส่วนของ Fe_2O_3 มากกว่าตำแหน่งอื่น ดังรูปที่



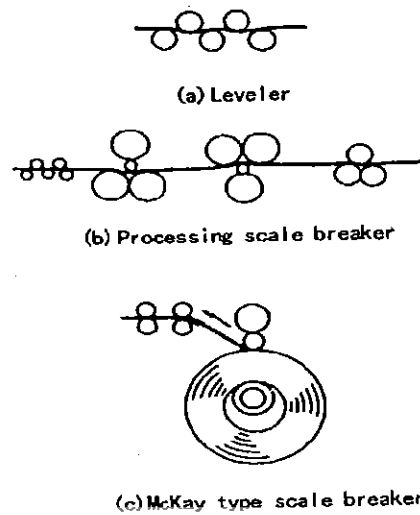
รูปที่ 2.10 ผลของ Coiling temperature ต่อ โครงสร้างของ Oxide scale
 ที่มา : R.Y. Chen(2001). Oxidation of Metals, Vol. 56, No. 1/2 . (pp. 89-118)

การกำจัด Oxide scale ออกจากผิวเหล็กที่ร้อนจะใช้เทคนิคที่เรียกว่า Pickling ซึ่งเป็นการใช้ สารละลายกรดละลาย (Dissolve) Oxide scale ออกจากผิวเหล็ก สารละลายกรดที่นิยมใช้จะมีอยู่ 2 ชนิด คือ

1. สารละลายกรด Sulfuric (H_2SO_4) ซึ่งสามารถละลาย FeO และเนื้อเหล็ก (Fe) ออกได้ง่าย แต่ Fe_3O_4 และ Fe_2O_3 แทบจะไม่ถูกละลายด้วยกรดชนิดนี้ ดังนั้นจะต้องมีการใช้ Scale breaker (ดังแสดงในรูปที่ 2.11) เพื่อทำให้เกิด Crack ที่ผิวเหล็กซึ่งสารละลายกรด Sulfuric จะสามารถซึมผ่าน Crack เข้าไปสัมผัสชั้น Fe และ FeO โดยตรงและเกิดปฏิกิริยาเคมีดังสมการ



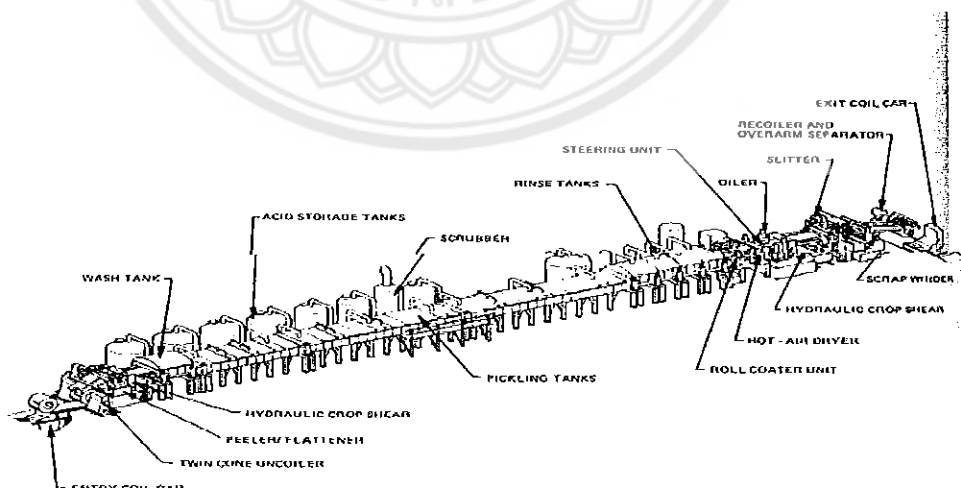
แม้ว่า Fe_3O_4 และ Fe_2O_3 แทบจะไม่ถูกละลายด้วยกรดชนิดนี้แต่ก๊าซ Hydrogen ที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวแยก Fe_3O_4 และ Fe_2O_3 ออกจากผิวเหล็ก



รูปที่ 2.11 ชนิดของ Scale Breaker

ที่มา : Cold Rolled Steel Sheet, The Iron and Steel Institute of Japan. (pp. 22)

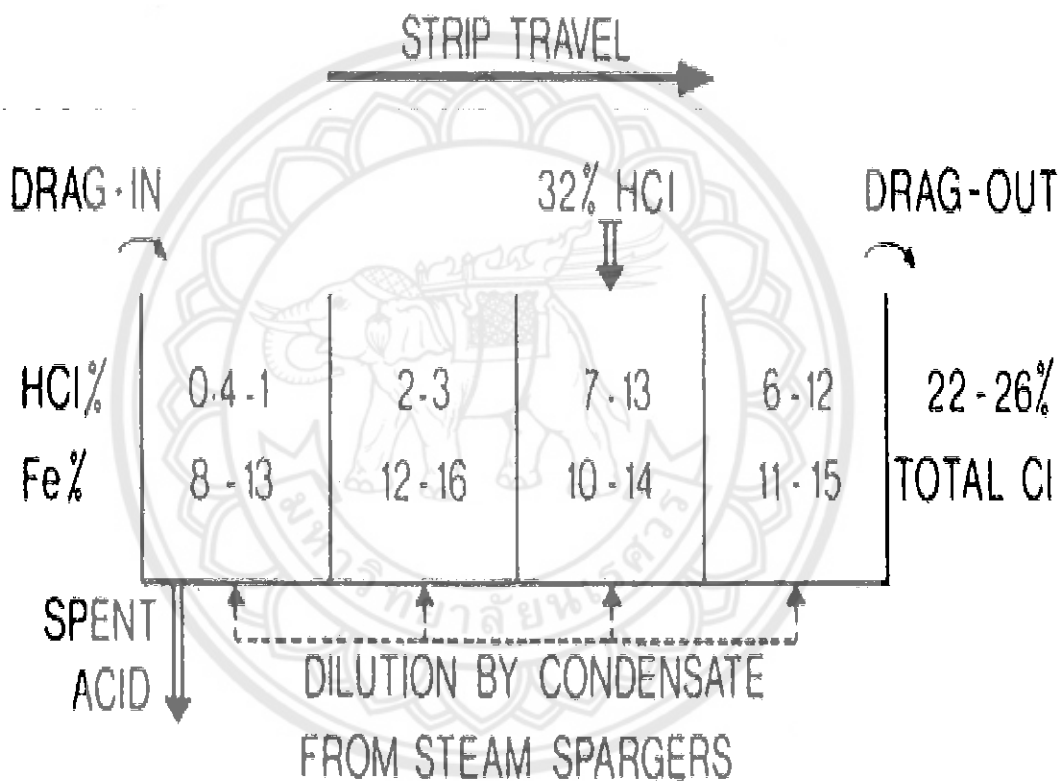
2. สารละลายกรด Hydrochloric (HCl) สามารถละลาย FeO, Fe₃O₄ และ Fe₂O₃ ออกจากเนื้อเหล็กได้ง่าย ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ Scale breaker แต่ถ้าใช้จะทำให้เวลาในการ Pickling สั้นลง ในกระบวนการ Pickling เหล็กแผ่นรีดร้อนจะใช้ Continuous pickling line ซึ่งประกอบด้วยถังกรด (Pickling tank) 3-5 ถังเรียงต่อกัน โดยแต่ละถังจะมีความยาว 20-30 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.12 เหล็กแผ่นรีดร้อนจะถูกเคลื่อนออกจากม้วนและวิ่งผ่านถังกรดทั้งหมดด้วยความเร็ว 40-360 เมตรต่อนาที



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างของ Pickling line

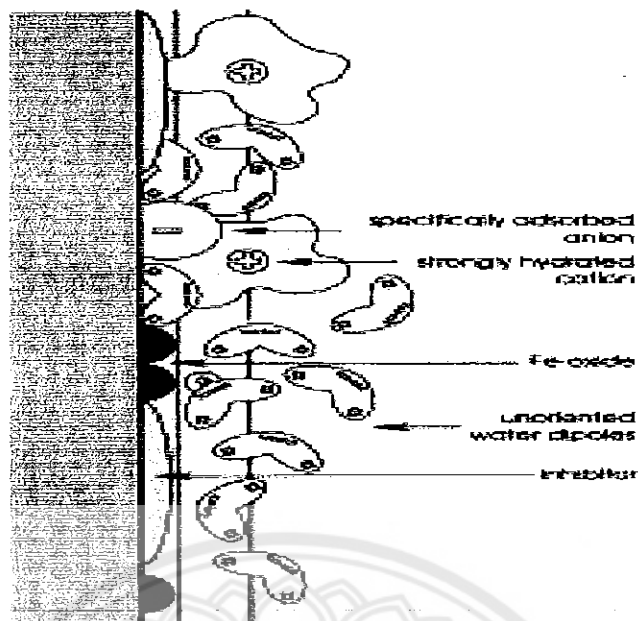
ที่มา : William L. Robert (2001). Flat Processing of Steel. (pp. 190)

ในกระบวนการ Continuous pickling จะต้องควบคุมความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารละลายกรดแต่ละถังให้เหมาะสม สำหรับสารละลายกรด Sulfuric จะอยู่ระหว่าง 15-25 เปอร์เซ็นต์ ส่วนสารละลายกรด Hydrochloric จะอยู่ระหว่าง 3-10 เปอร์เซ็นต์ โดยความเข้มข้นจะเริ่มจากน้อยในถังที่ 1 และเพิ่มมากขึ้นในถังต่อมา ส่วนอุณหภูมิในถังจะควบคุมให้อยู่ระหว่าง 80-100 องศาเซลเซียส ตัวอย่างการ ควบคุมความเข้มข้นของสารละลายกรด Hydrochloric จะแสดงไว้ในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างการควบคุมความเข้มข้นกรดใน Pickling line
ที่มา : William L. Robert(2001). Flat Processing of Steel. (pp. 191)

ข้อควรระวังสำหรับกระบวนการ Pickling คือ เหล็ก (Fe) จะถูกละลายได้ง่ายกว่า Oxide scale ทำให้ง่ายต่อการเกิด Overpickling ซึ่งเกิดจาก Corrosion ที่ผิวเหล็ก ทำให้ผิวเหล็กเป็นสีเทาดำ ไม่มันวาว การป้องกัน Overpickling มักจะทำโดยการเติม Inhibitor ลงไปในถังกรด Inhibitor จะทำให้เกิด Film บนผิวเหล็กซึ่งป้องกันการเกิด Corrosion ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ตัวอย่างของ Inhibitor แสดงไว้ในตารางที่ 2.5



รูปที่ 2.14 กลไกการป้องกันการเกิด Overpickling ด้วย Inhibitor

ที่มา : U,Etzold(2001).The Use of Corrosion Inhibitors in Steel Strip Production and Coating

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่าง Inhibitors

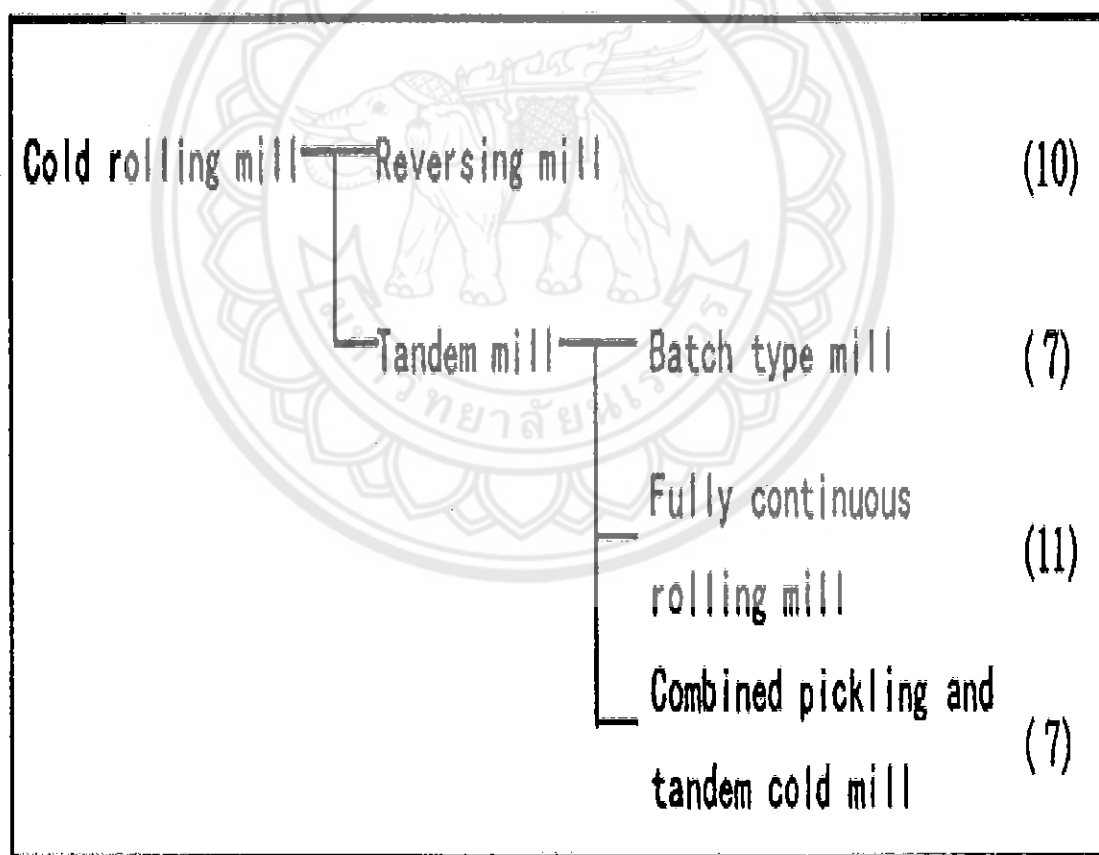
Electron-rich group	Chemical formula
Alkenes	-C = -C
Alcohols	RC-OH
Amines	C-NR ₂
Polymerized aromatics	Ph-X-Ph
Heteroaromatics	C ₃ N ₃ RX

ที่มา : U, Etzold(2001). The Use of Corrosion Inhibitors in Steel Strip Production and Coating

หลังจากที่เหล็กแผ่นรีดร้อนผ่านกระบวนการ Pickling เพื่อกำจัด Oxide scale ออกจากผิวเหล็กเรียบร้อยแล้ว เหล็กก็จะถูกนำไปวิ่งผ่านถังน้ำหรือผ่าน Spray ฟันเพื่อล้างกรดออกจากผิวเหล็ก จากนั้นเหล็กก็จะถูกนำไปรีดเย็นเพื่อลดความหนาที่ Cold rolling mill ซึ่งสามารถแบ่งได้ เป็น 2 ประเภทรูปที่ 2.15 และรูปที่ 2.16

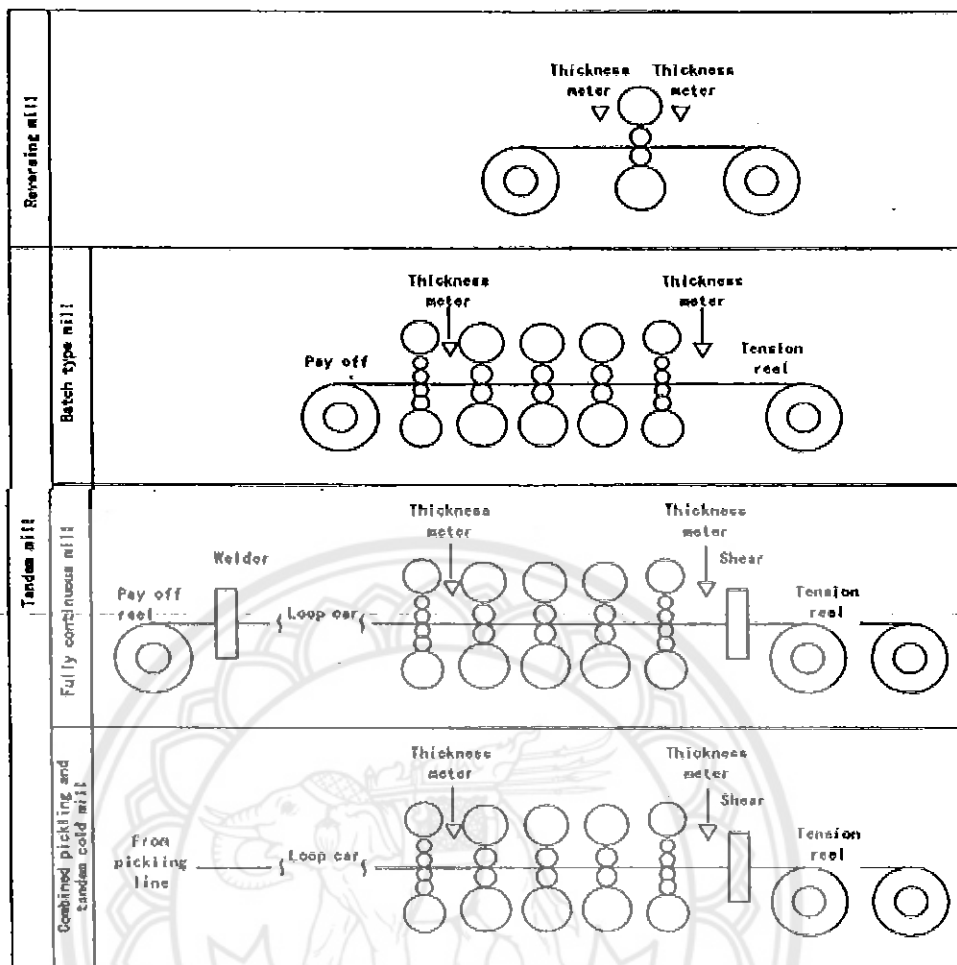
1. Reversing mill (เป็นแบบ One-strand) ซึ่งจะมีทิศทางการรีดแบบ ไป-กลับ การรีดแบบนี้ จะมีกำลังการผลิตต่ำ ดังนั้น Mill ชนิดนี้จึงเหมาะสำหรับรีดเหล็กที่ต้องการคุณภาพสูงหรือเหล็กเกรดพิเศษ

2. Tandem mill (เป็นแบบ Multi-strand) มักประกอบด้วย 2-6 Strands การรีดแบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูงเหมาะสำหรับการผลิตเหล็กเกรดที่เป็น Mass production โดยทั่วไปจะนิยมใช้แบบ Batch type mill แต่เพื่อเพิ่มกำลังการผลิตจะมีการติดตั้งเครื่องเชื่อม (Welder) และ Loop car เข้ากับ Batch type mill เพื่อให้ Loop car ทำหน้าที่เก็บสะสม เหล็กในช่วงทำ Coil ไว้และเครื่องเชื่อมจะทำหน้าที่เชื่อมท้าย Coil ที่กำลังถูกรีดกับหัว Coil ใหม่เข้าด้วยกัน ทำให้ไม่ต้องหยุดการผลิตเพื่อเปลี่ยน Coil ใหม่ Mill แบบนี้เรียกว่า Fully continuous rolling mill ถ้าหากมีการนำ Pickling line เข้ามาเชื่อมต่อไว้กับ Fully continuous rolling mill เพื่อให้กระบวนการผลิตมีความต่อเนื่องมากขึ้น จะเรียก Mill ชนิดนี้ว่า Combined pickling and tandem cold mill



รูปที่ 2.15 ลักษณะ Cold rolling mill แบบต่างๆ

ที่มา : Cold Rolled Steel Sheet, The Iron and Steel Institute of Japan. (pp. 25)



รูปที่ 2.16 Cold rolling mill

ที่มา : Cold Rolled Steel Sheet, The Iron and Steel Institute of Japan. (pp. 25)

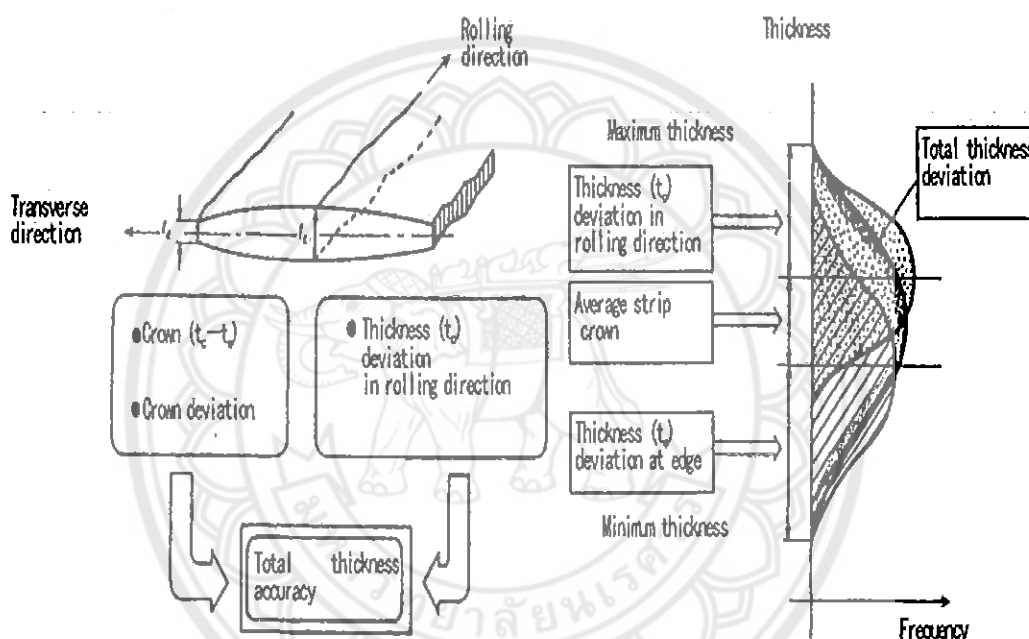
เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีดเย็นมีคุณภาพตามที่ระบุในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ การรีดเย็นจะต้องมีการกำหนดและควบคุมตัวแปรหลัก 3 ตัวคือ

1. การกำหนด Rolling schedule โดยทั่วไปการรีดเย็นจะมีสัดส่วนการลดขนาดจากเหล็กแผ่นรีดร้อนประมาณ 40-95 เปอร์เซ็นต์ เรียกว่า Total reduction ratio สำหรับการรีดแบบ Tandem mill จะต้องมีการกระจาย Total reduction ratio ไปแต่ละ Strand การกำหนด Reduction ratio ในแต่ละ Strand คือ การกำหนด Rolling schedule จะเกี่ยวข้องกับการ กำหนดช่องว่างระหว่างลูกรีด (Roll gap) แรงกดจากลูกรีด (Roll force) ความเร็วของลูกรีด (Roll speed) ซึ่งการกำหนด Rolling schedule จะมีผลกระทบโดยตรงต่อความสม่ำเสมอของความหนา (Thickness) ความเรียบ (Flatness) และสมบัติของเหล็กแผ่นรีดเย็น โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีดร้อนจะมีความหนาอยู่ในช่วง 0.15-3.2 มิลลิเมตร

2. การควบคุมความหนา (Thickness) การควบคุมความหนาจะแบ่งได้เป็น 2 แนว คือ

1. ตามแนวยาวของ Coil ซึ่งค่าที่ใช้ คือ Thickness deviation ตามทิศทางการรีด ดังแสดงในรูปที่ 2.17 โดยความไม่แน่นอนของความหนาจะเกิดที่หัว Coil (Head) และที่ท้าย Coil (Tail) ซึ่งเป็นช่วงที่ใช้ความเร็วในการรีดต่ำ

2. ตามแนวกว้างของ Coil ค่าที่ใช้ควบคุมคือ Crown ซึ่งเป็นความแตกต่างระหว่างความหนาที่จุดกึ่งกลางของความกว้างกับความหนาที่ขอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 สาเหตุการเกิดปัญหาเรื่องความไม่สม่ำเสมอของความหนา อาจมาจากคุณภาพของเหล็กแผ่นรีดร้อนหรือจากกระบวนการรีดเย็น



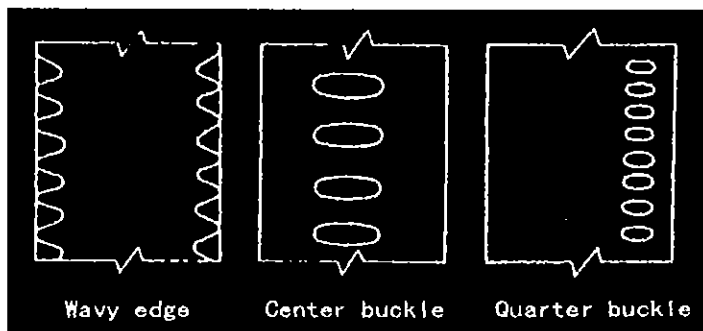
รูปที่ 2.17 Crown และ Thickness deviation

ที่มา : Cold Rolled Steel Sheet, The Iron and Steel Institute of Japan,(pp. 30)

3. การควบคุมความเรียบ (Flatness) ถ้าหากการควบคุมความเรียบไม่เพียงพอจะเกิดปัญหากับความเรียบของเหล็กได้ 3 ลักษณะ คือ

1. เกิดลักษณะเป็นคลื่นที่ขอบ (Wavy edge)
2. เกิดการนูนที่กึ่งกลางความกว้าง(Center buckle)
3. เกิดการนูนระหว่างจุดกึ่งกลาง ความกว้างกับขอบ

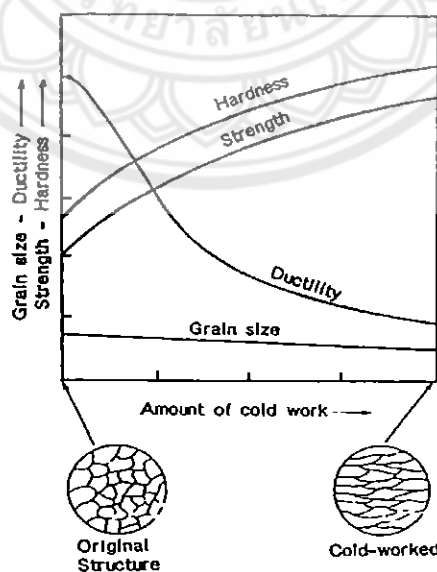
ดังแสดงในรูปที่ 2.18 เช่นเดียวกับปัญหาเรื่องความหนา สาเหตุการเกิดจากปัญหาเรื่องความเรียบ อาจมาจากคุณภาพของเหล็กแผ่นรีดร้อนหรือจากกระบวนการรีดเย็น



รูปที่ 2.18 ปัญหาเรื่องความเรียบของเหล็ก

ที่มา : Cold Rolled Steel Sheet, The Iron and Steel Institute of Japan. (pp. 33)

เนื่องจากกระบวนการรีดเย็นเป็นการรีดที่อุณหภูมิห้อง แม้ว่าในขณะที่ถูกรีดเหล็กจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นบ้างเนื่องจากการแปรรูปและแรงเสียดทาน แต่อุณหภูมิที่สูงขึ้นมาก็ไม่เพียงพอต่อการเกิด Restoration process ดังเช่นในกระบวนการรีดร้อน ทำให้เหล็กที่ผ่านการรีดเย็นมาจะมีลักษณะของ Grain ที่ยาวเรียกว่า Elongated grain และมีพลังงานตกค้างอยู่ในโครงสร้างเหล็ก ส่งผลให้เหล็กมีความแข็ง (Hardness) และความแข็งแรง (Strength) เพิ่มมากขึ้นแต่มีความเหนียวลดลง เรียกสภาวะนี้ว่า เหล็กถูก Cold-worked ดังรูปที่ 2.19 หากนำเหล็กที่อยู่ในสภาวะ Cold-worked ไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องผ่านการขึ้นรูป เหล็กอาจจะแตกหรือฉีกขาดได้ นอกจากนั้นเหล็กที่อยู่ในสภาพ Cold work จะง่ายต่อการเกิดสนิม

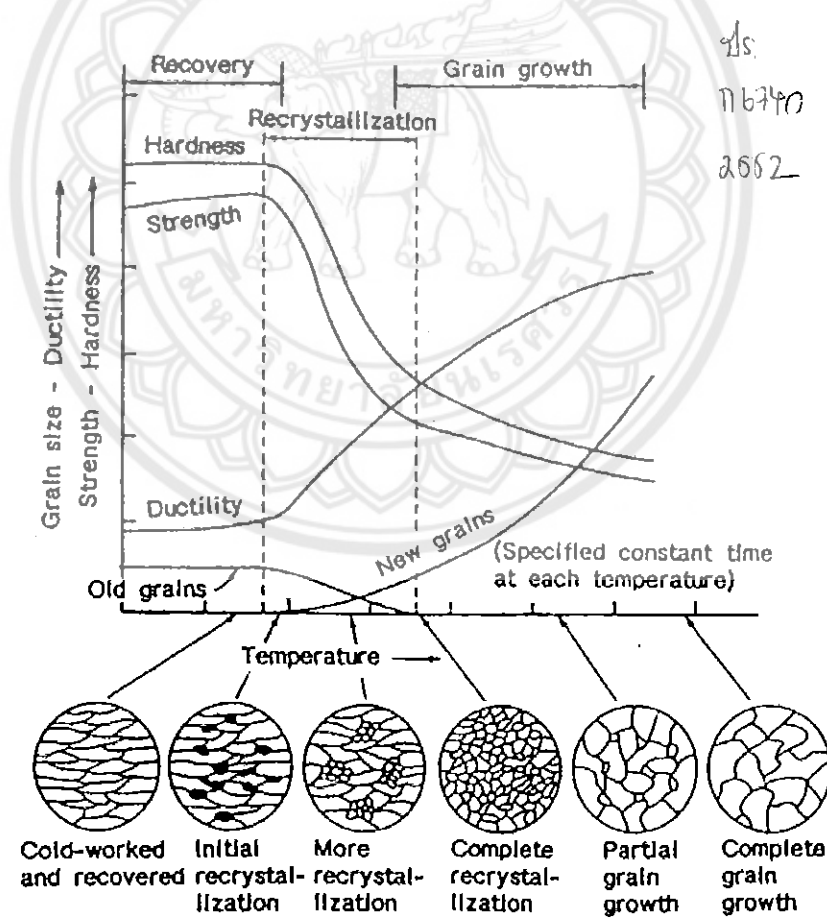


รูปที่ 2.19 การเกิด Cold work หลังจากรีดเย็น

ที่มา : Vladimir B. Ginzburg, Flat Rolling Fundamentals. (pp.348)

เพื่อให้เหล็กที่ผ่านการรีดเย็นและอยู่ในสภาวะ Cold-worked สามารถนำไปผลิตชิ้นผลิตภัณฑ์ที่ต้องผ่านการขึ้นรูปลึก จำเป็นที่จะต้องขจัดสภาวะ Cold-worked ด้วยขั้นตอนเพิ่มเติมที่เรียกว่า Annealing ซึ่งเป็นการนำเหล็กไปอบที่อุณหภูมิสูงกว่า Recrystallization temperature ประมาณ 500-550 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิด Restoration process ซึ่งจะเกิดกลไกการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็ก 3 กลไกตามลำดับ ดังรูปที่ 2.20 คือ

1. Recovery เป็นช่วงเริ่มต้นของการเกิด Restoration process ซึ่งช่วงนี้โครงสร้างของเหล็ก จะไม่เปลี่ยนแปลงส่งผลให้ขนาดของ Grain (Grain size) ความเหนียว (Ductility) ความแข็ง (Hardness) และความแข็งแรง (Strength) แทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง
2. Recrystallization เป็นช่วงที่มี Grain ใหม่ขนาดเล็กเกิดขึ้นตามขอบ Grain เดิม ส่งผลให้ความเหนียว (Ductility) ของเหล็กเพิ่มขึ้น แต่ความแข็ง (Hardness) และความแข็งแรง (Strength) ลดลง
3. Grain growth เป็นช่วงที่มี Grain ใหม่ขนาดเล็กมีขนาดเพิ่มขึ้นแต่มีจำนวนลดลง

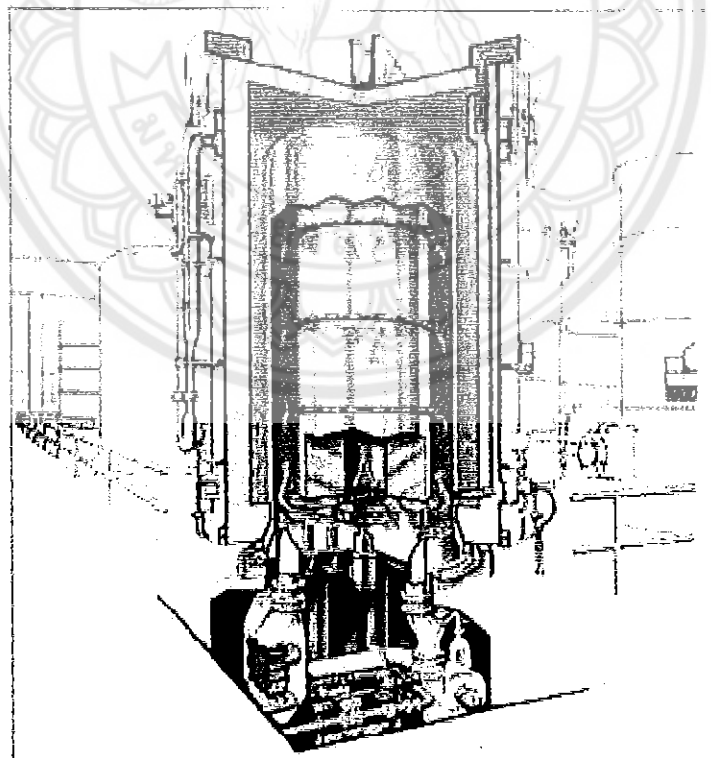


รูปที่ 2.20 การเกิด Restoration process หลังจาก Annealing

ที่มา : Vladimir B. Ginzburg, Flat Rolling Fundamentals. (pp. 349)

กระบวนการ Annealing เหล็กแผ่นรีดร้อนจะแบ่งได้เป็น 2 แบบ หลักๆ คือ Batch Annealing และ Continuous annealing

แบบที่ 1. Batch annealing เป็นกระบวนการที่เหล็กรีดเย็นซึ่งม้วนเป็น Coil ถูกนำมาเรียงซ้อนกัน ในแนวตั้ง และถูกปิดครอบด้วยฝาเตาที่ให้ความร้อน ดังรูปที่ 2.21 พร้อมทั้งพ่น Protective gas เพื่อป้องกันการเกิด Oxidation ที่ผิวเหล็กขณะอบที่อุณหภูมิสูง โดยมีการใช้พัคลมเป่าที่ฐาน เพื่อให้ Protective gas ไหลเวียนภายในเตาและเป็นการกระจายความร้อนทั่วเตา กระบวนการ Batch annealing ทั่วไป (Conventional) มักจะใช้ Protective gas เป็นส่วนผสมระหว่าง Nitrogen (N_2) กับ 0-20 เปอร์เซ็นต์ Hydrogen (H_2) ต่อมาได้มีการพัฒนามาใช้ Protective gas เป็น 100 เปอร์เซ็นต์ Hydrogen (H_2) เรียกว่า Hydrogen batch annealing เนื่องจาก Hydrogen มีการนำความร้อน (Thermal conductivity) สูงกว่า Nitrogen 7 เท่า และมีความหนาแน่นน้อยกว่า Nitrogen ประมาณ 1 ใน 14 เท่า ทำให้การ ไหลเวียนของ Protective gas และกาถ่ายเทความร้อนดีขึ้น ส่งผลให้การเพิ่มอุณหภูมิของ Coil เป็นไปอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอทั่วทั้งเตา ซึ่งเป็นการเพิ่มผลผลิต ช่วยในการประหยัดพลังงาน และปรับปรุงคุณภาพเหล็ก นอกจากนั้นการใช้ 100 เปอร์เซ็นต์ Hydrogen ยังช่วยป้องกันการ Oxidation ได้ดีขึ้นด้วย



รูปที่ 2.21 กระบวนการ Batch annealing

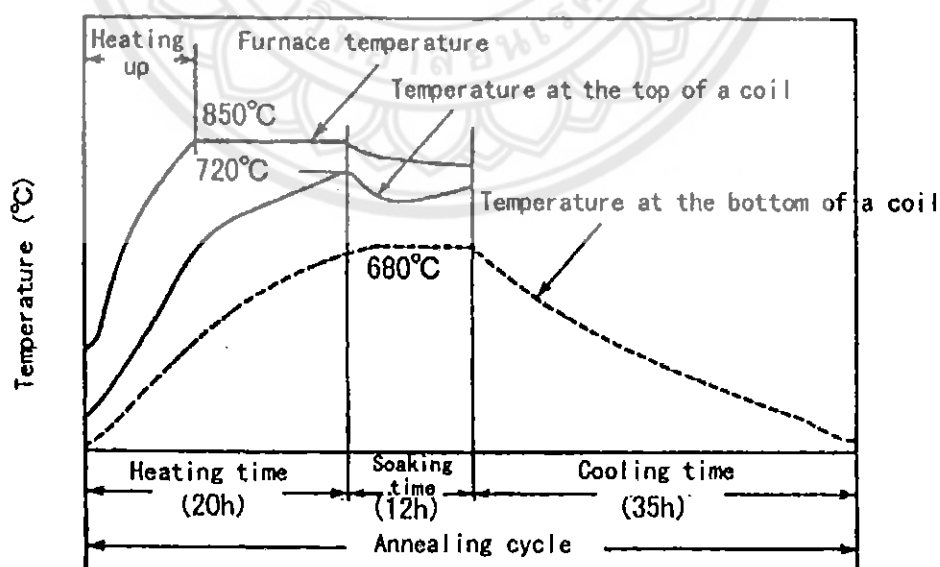
ที่มา : Jean Marc Raick(2004). MPT International, No.1. (pp. 31-42)

Batch annealing ประกอบด้วยขั้นตอนหลักๆ 3 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.22 คือ

ขั้นตอนที่ 1 Heating เป็นขั้นตอนที่ให้ความร้อนเพื่อให้เหล็กมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึง Soaking temperature ประมาณ 650-700 องศาเซลเซียส (ใกล้กับอุณหภูมิ A_1) ในช่วงนี้จะมีการ Precipitate ของ Aluminium Nitride (AlN) จะทำหน้าที่ชะลอการเกิด Recrystallization ส่งผลให้เกิด Grain ที่มีขนาดใหญ่ซึ่งเป็นผลดีต่อการขึ้นรูป นอกจากนั้น AlN ยังก่อให้เกิด Texture แบบ (111) ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป

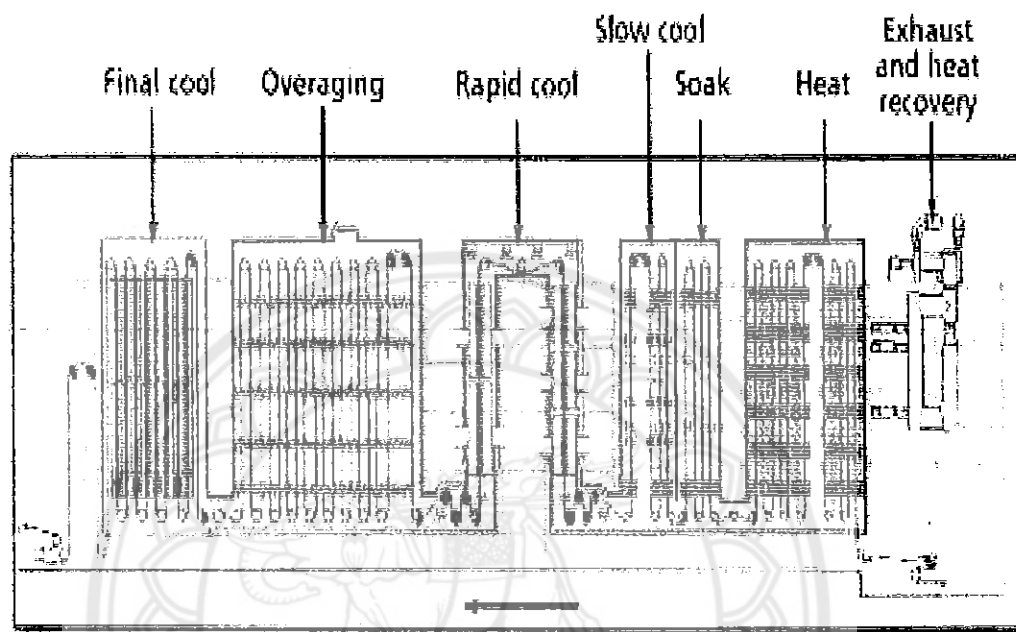
ขั้นตอนที่ 2 Soaking เป็นขั้นตอนที่คงเหล็กไว้ที่ Soaking Temperature ซึ่งที่อุณหภูมินี้ จะมีการเกิด Grain growth จนมีขนาดประมาณ ASTM เบอร์ 5-6 ในกระบวนการผลิตจะควบคุม อุณหภูมิและเวลาให้สอดคล้องกัน ในเบื้องต้นต้องกำหนดในการ Soaking ให้พอที่อุณหภูมิของ Coil ที่อยู่ล่างสุดของเตา (ซึ่งเป็น Cold spot) สูงถึง Soaking temperature การเพิ่มอุณหภูมิและเวลา ในการ Soaking จะทำให้ความสามารถในการขึ้นรูปเพิ่มมากขึ้น แต่ถ้ามากไปอาจทำให้เหล็กที่ม้วน อยู่ติดกันหรือทำให้เกิด Grain ที่มีขนาดใหญ่เกินไป ซึ่งจะเป็นสาเหตุของการเกิดผิวที่ขรุขระ หลังจากการขึ้นรูป นอกจากนั้นอาจทำให้เกิด Carbide ที่มีขนาดหยาบ ซึ่งจะไม่เป็นผลดีต่อการ นำไปขึ้นรูป

ขั้นตอนที่ 3 Cooling เป็นการปล่อยให้เหล็กเย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะเป็นช่วงที่ Carbon ซึ่งละลายอยู่ใน Ferrite ในสภาพ Solid solution ในขั้นตอน Soaking จะ Precipitate เป็น Carbide อยู่ตามขอบเกรน



รูปที่ 2.22 ขั้นตอนและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขณะทำ Batch annealing
ที่มา : Cold Rolled Steel Sheet, The Iron and Steel Institute of Japan. (pp. 55)

แบบที่ 2. Continuous annealing เป็นกระบวนการผลิตที่ถูกพัฒนาขึ้นหลังจาก Batch annealing เหล็กรีดเย็นซึ่งม้วนเป็น Coil จะถูกคลี่ออกมาและวิ่งผ่านกระบวนการผลิตในลักษณะที่ต่อเนื่องด้วยความเร็วสูง ดังรูปที่ 2.23 ทำให้เหล็กถูกให้ความร้อนและถูกทำให้เย็นตัวในช่วงระยะเวลาสั้นๆ



รูปที่ 2.23 กระบวนการ Continuous annealing

ที่มา : Jean Marc Raick(2004). MPT International, No.1.(pp. 31-42)

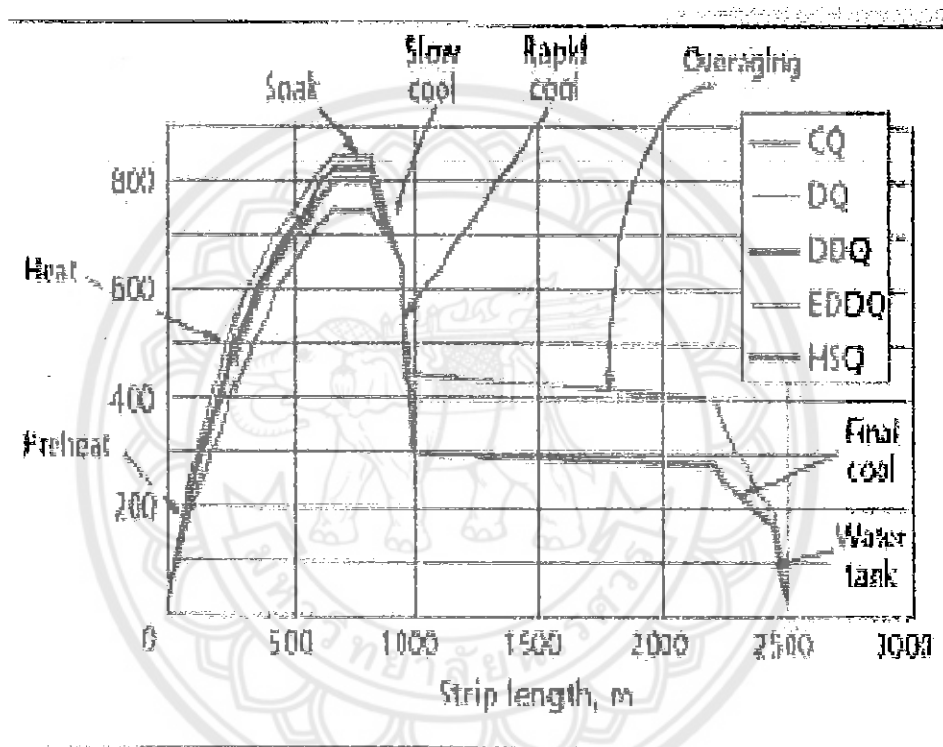
Continuous annealing ประกอบด้วยขั้นตอนหลักๆ 3 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.24 คือ

ขั้นตอนที่ 1 Heating เป็นการให้ความร้อนแก่เหล็กเพื่อให้มีอุณหภูมิสูงถึง Soaking temperature เนื่องจากกระบวนการ Continuous annealing เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนจะสั้น การเกิด Precipitation ของ AlN จะเกิดได้ยากส่งผลให้ Nitrogen อยู่ในสภาพ Solid solution ซึ่งจะไม่เป็นผลต่อการขึ้นรูปและทำให้เกิด Aging ได้ง่ายวิธีแก้ไขคือ จะต้องควบคุม Coiling temperature ของเหล็กแผ่นรีดร้อนที่นำมาทำ Continuous annealing ให้สูงถึง 710 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิด Precipitation ของ AlN ในระหว่าง Coiling ส่งผลให้เหล็กที่จะนำมารีดเย็นมี Nitrogen ในสภาพ Solid solution น้อย

ขั้นตอนที่ 2 Soaking สำหรับกระบวนการ Continuous annealing จะควบคุมให้ Soaking temperature ประมาณ 650-700 องศาเซลเซียส (สูงกว่าอุณหภูมิ A_1 เล็กน้อย) ซึ่งจะสูงกว่าใน Batch annealing ทำให้อัตราการโตของ Grain สูงขึ้น เพื่อชดเชยกับเวลาในการ Soaking ที่สั้น

ขั้นตอนที่ 3 Rapid cooling เป็นการทำให้เหล็กถูกเย็นตัวอย่างรวดเร็วลงมาถึงอุณหภูมิ สำหรับการทำ Overaging ซึ่งอยู่ในช่วงประมาณ 400-450 องศาเซลเซียส การเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะทำให้ Carbon ซึ่งละลายอยู่ใน Ferrite ในสภาพ Solid solution ในขั้นตอน Soaking จะ Precipitate เป็น Carbide ยาก

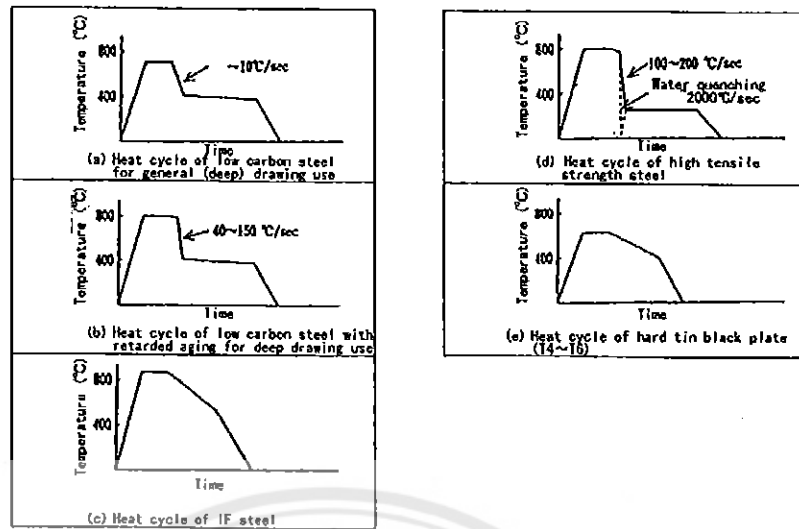
ขั้นตอนที่ 4 Overaging เป็นการแช่เหล็กไว้ที่ Overaging temperature โดยมีจุดประสงค์ ให้ Carbon ซึ่งละลายอยู่ใน Ferrite ในสภาพ Supersaturated solid solution จากขั้นตอน Rapid cooling สามารถ Precipitate เป็น Carbide



รูปที่ 2.24 ขั้นตอนการทำ Continuous annealing

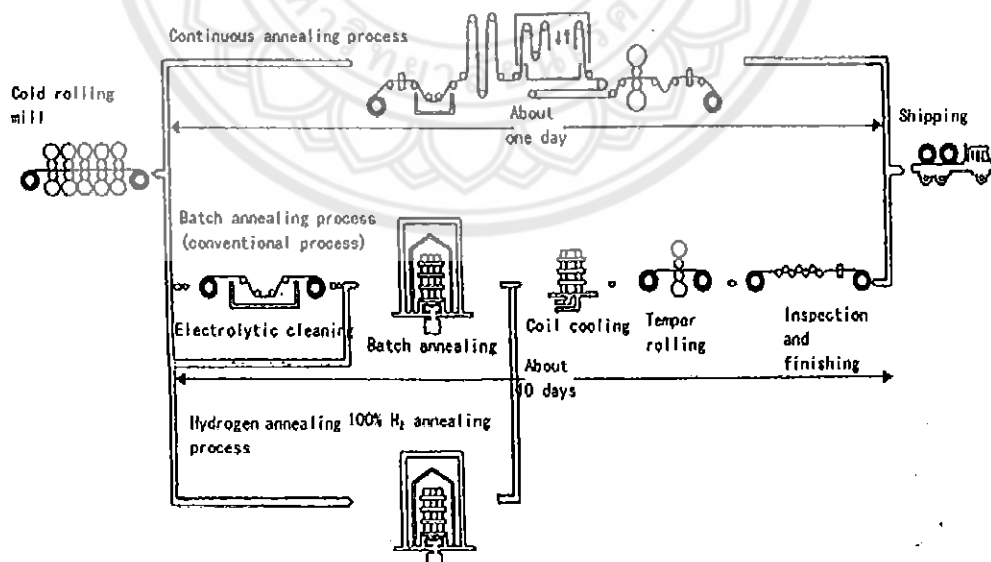
ที่มา : Jean Marc Raick(2004). MPT International, No.1.(pp. 31-42)

เนื่องจากกระบวนการ Continuous annealing มีอัตราการให้ความร้อนและอัตราการเย็นตัวที่สูง ทำให้กระบวนการ Continuous annealing ถูกนำมาใช้ผลิตเหล็กได้หลากหลายชนิด โดยเฉพาะ เหล็กแผ่นในกลุ่มที่มีความแข็งแรงสูง เช่น Dual-phase steel หรือ TRIP steel ซึ่งไม่สามารถผลิต ด้วย Batch annealing อย่างไรก็ตามการผลิตเหล็กแต่ละชนิดด้วย Continuous annealing จะต้องมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ เวลาและการเย็นตัวให้สอดคล้องกับส่วนผสมทางเคมี และ โครงสร้างของเหล็กชนิดนั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.25



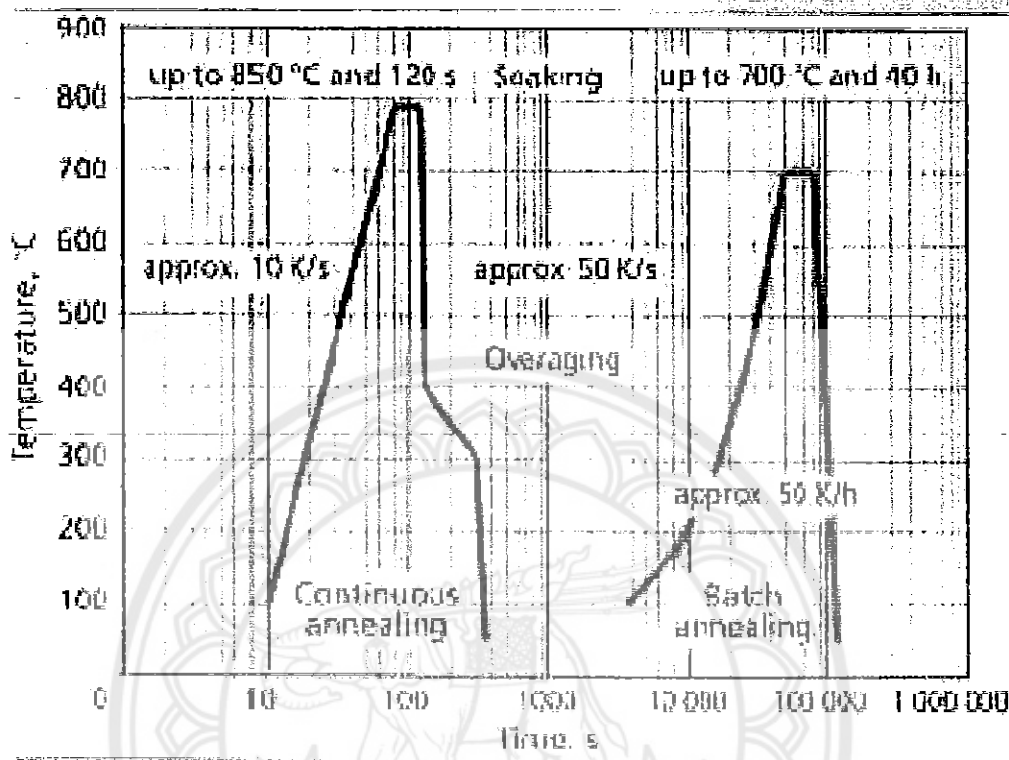
รูปที่ 2.25 ขั้นตอนการทำ Continuous annealing สำหรับเหล็กชนิดต่างๆ
ที่มา : Cold Rolled Steel Sheet, The Iron and Steel Institute of Japan, pp. 46

เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง Batch annealing และ Continuous annealing พบว่าจุดแตกต่างที่เด่นชัด คือ เวลาที่ใช้ในการผลิตเหล็กหนึ่ง Coil ซึ่งปกติ Batch annealing จะใช้เวลาประมาณ 10 วัน แต่ Continuous annealing จะใช้เวลาประมาณ 1 วัน ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 การเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการ Batch annealing และ Continuous annealing
ที่มา : Cold Rolled Steel Sheet, The Iron and Steel Institute of Japan. (pp. 40)

ซึ่งความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิตเป็นผลจากความแตกต่างของอัตรา
การให้ความร้อน อัตราการเย็นตัวและ ระยะเวลาที่ใช้ในการ Soaking ดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 ความแตกต่างระหว่างขั้นตอนการทำ Batch annealing และ Continuous annealing
ที่มา : Jean Marc Raick(2004). MPT International, No.1.(pp. 31-42)

แม้ว่า Continuous annealing จะมีจุดเด่นในเรื่องของเวลาที่ใช้ผลิตเหล็กแต่ละ Coil เมื่อเทียบกับ Batch annealing แต่ Continuous annealing ก็ยังมีจุดด้อยในเรื่องของชนิดและคุณภาพของเหล็กแผ่นรีดร้อนที่จะนำมาผลิต ดังแสดงในรูปที่ 2.28 ซึ่งจะเห็นได้ว่า สำหรับเหล็กระดับคุณภาพ Commercial เหล็กที่จะนำมาทำ Continuous annealing จะต้องมียุค Carbon (C) และ Manganese (Mn) ที่ต่ำกว่าเหล็กที่จะนำมาทำ Batch annealing สำหรับเหล็กระดับคุณภาพ Drawing, Deep drawing หรือ Extra-deep drawing กระบวนการ Continuous annealing จะต้องใช้เหล็กที่เป็น IF steel (Interstitial-free steel) ซึ่งจะต้องเป็นเหล็กที่ผ่านกระบวนการผลิตที่ซับซ้อน โดยเหล็กจะต้องเป็นเหล็กผ่านกระบวนการ Vacuum degassing เพื่อลดปริมาณ Carbon ให้อยู่ในสภาพ Ultra-low carbon จากนั้นจะต้องมีการเติม Ti หรือ Nb เพื่อไปจับกับ Carbon หรือ Nitrogen เพื่อไม่ให้ Carbon และ Nitrogen หลงเหลืออยู่ในสภาพ Solid solution จะเห็นได้ว่า ต้นทุนของวัตถุดิบสำหรับกระบวนการ Continuous annealing จะสูงกว่าของ Bath annealing

Batch annealing				Continuous annealing		
	Steel type	max. C (%)	max. Mn (%)	Steel type	max. C (%)	max. Mn (%)
CQI	UA	0.10	0.40	UA	0.060	0.25
CQII	UA	0.08	0.30	UA	0.025	0.20
				IF	0.007	0.20
DQ	UA	0.06	0.25	IF	0.007	0.20
DDQ	UA	0.05	0.22	IF	0.005	0.20
EDDQ	UA	0.035	0.20	IF	0.0025	0.20

CQ = commercial quality
 DQ = drawing quality
 DDQ = deep drawing quality
 EDDQ = extra deep drawing quality

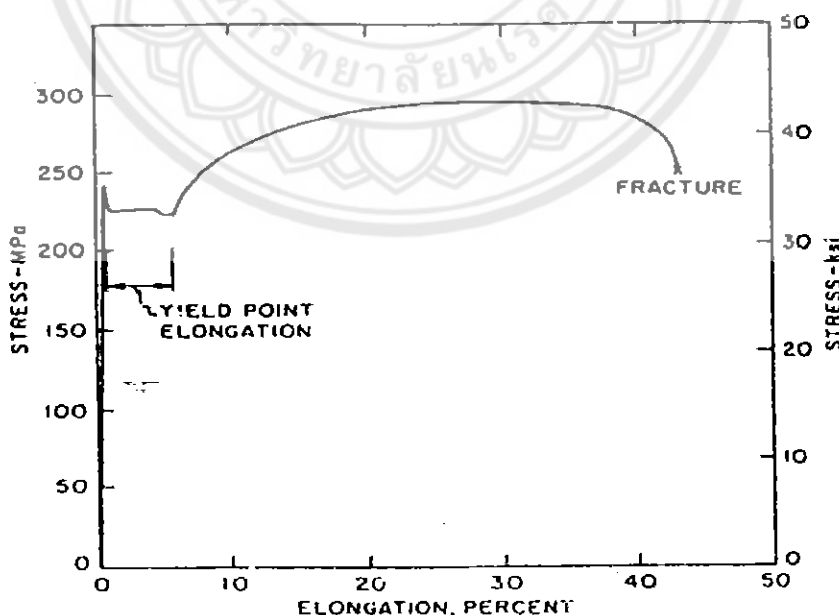
UA = unalloyed, low carbon Al-killed
 IF = ultra-low carbon, Ti-stabilised interstitial free

รูปที่ 2.28 ความแตกต่างของส่วนผสมทางเคมีของเหล็กระหว่างการทำ

Batch annealing และ Continuous annealing

ที่มา : Jean Marc Raick(2004). MPT International, No.1.(pp. 31-42)

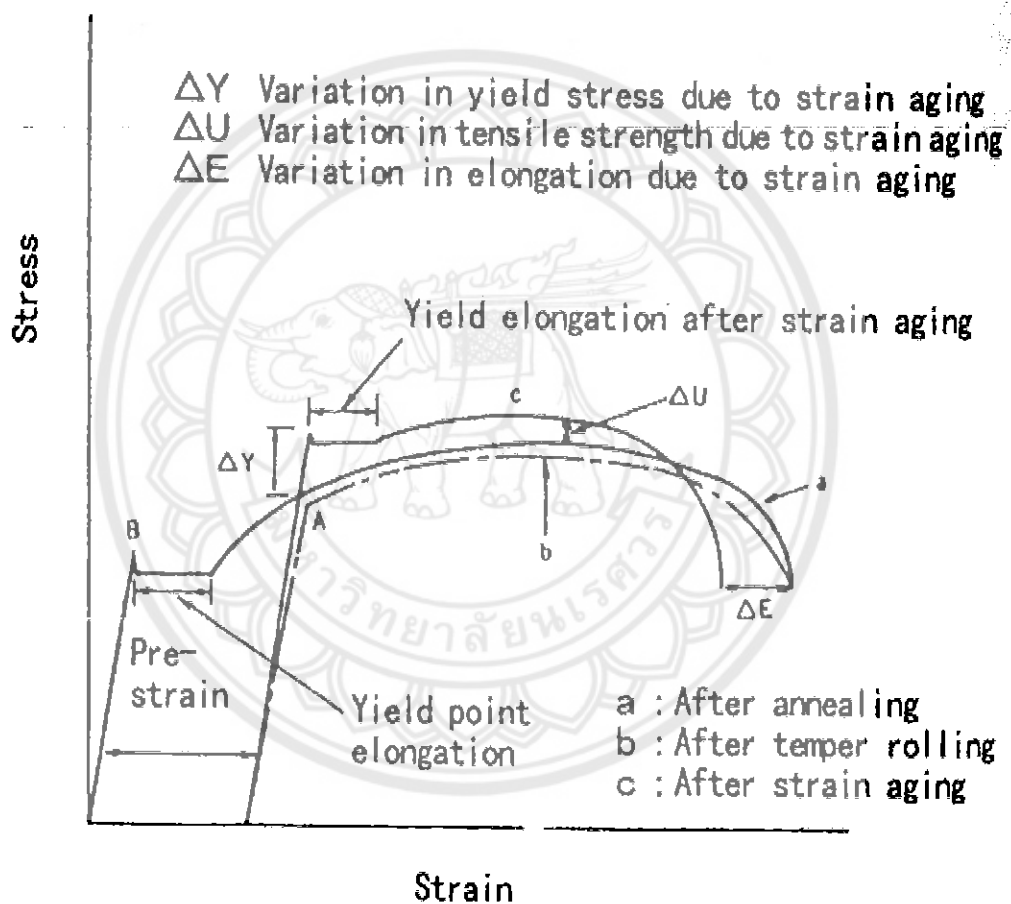
เหล็กส่วนใหญ่ที่ผ่านการ Annealing มักจะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Yield point elongation ดังแสดงในรูปที่ 2.29 ซึ่งเมื่อนำไปขึ้นรูปจะเกิดเป็นรอยที่ผิวเหล็กเรียกว่า Stretcher strain หรือ Lueders band การแก้ไขปัญหานี้ในกระบวนการผลิตเหล็กรีดเย็นหลังจาก Annealing จะใช้ Temper rolling หรือ Skinpass rolling ซึ่งเป็น Single-strand four-hill mill หรือ 2-strand four high mill มาทำการรีดเย็นลดขนาดลงด้วย Reduction ratio ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ Temper rolling หรือ Skinpass rolling ยังช่วยในการปรับปรุง Flatness อีกด้วย



รูปที่ 2.29 การเกิด Yield point elongation

ที่มา : Vladimir B. Ginzburg(2004) . Flat Rolling Fundamentals. (pp. 349)


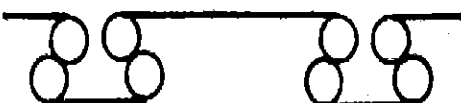
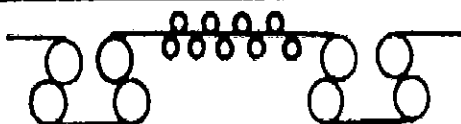
แม้ว่าเหล็กจะผ่านกระบวนการ Temper rolling มาแล้วก็ตาม เมื่อทิ้งไว้นานๆ ก็พบว่า Yield point elongation จะกลับมาก่อขึ้นอีก ยิ่งไปกว่านั้น Yield และ Tensile strength ก็จะสูงขึ้นแต่ Elongation จะลดลงทำให้ความสามารถในการขึ้นรูปลดลงปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Strain aging (ดังแสดงในรูปที่ 2.30) ซึ่งเกิดจากการที่ C และ N เคลื่อนที่มาจับกับ Dislocation ที่เกิดจาก Temper rolling ส่วนมาก Temper rolling มักจะเกิดกับเหล็กที่ผ่านการ Continuous annealing มากกว่า Batch annealing เนื่องจากใน Batch annealing Nitrogen จะเปลี่ยนเป็น AlN เกือบทั้งหมดส่วน Carbon ก็จะเปลี่ยนเป็น Carbide เกือบทั้งหมดด้วย



รูปที่ 2.30 การเกิด Strain aging

ที่มา : Cold Rolled Steel Sheet, The Iron and Steel Institute of Japan. (pp. 101)

หลังจากเหล็กผ่านการ Annealing เรียบร้อยแล้ว เพื่อให้มีความเรียบ (Flatness) เพิ่มขึ้น เหล็กจะถูกนำไปผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่า Leveler ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ ดังแสดงในรูปที่

	Type	Main function	Illustrative principle
a	Roller leveler	Alternating bending (Local stretch and compression)	
b	Stretcher-leveler	Stretch	
c	Tension leveler	Alternating stretching and bending	

รูปที่ 2.31 Leveler แบบต่างๆ

ที่มา : Cold Rolled Steel Sheet, The Iron and Steel Institute of Japan. (pp. 61)

2.5.2 การดึงโลหะ (Drawing)

ใช้วิธีดึงโลหะผ่านแบบ (Die) ซึ่งจะออกแบบให้มีรูปร่างตามต้องการ โดยทั่วไปมักใช้ในการผลิตเส้นลวดโลหะ เรียกว่าการทำ Wire Drawing การดึงโลหะนี้จะเกิดการเสียดสีอย่างรุนแรงระหว่างโลหะกับ Die ดังนั้น โลหะที่ทำเป็น Die จะต้องมีความแข็งแรงสูงมาก จะใช้พวกทั้งสแตนคาร์ไบด์

2.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลทรรศน์ (Microscope)

ชิ้นทดสอบจะถูกเตรียมด้วยการตัดด้วยแผ่นตัด โดยห้ามมิให้เกิดความร้อนระหว่างการตัดมากเกินไป หรือใช้แรงกดตัดมากเกินไป เพราะจะทำให้โครงสร้างเสียรูป เพื่อสะดวกให้การจับชิ้นทดสอบมาทำการขัดให้ผิวเรียบจะมีการหล่อด้วยพลาสติกให้หุ้มชิ้นทดสอบแล้วจึงนำไปขัดกระดาษทรายและสารขัดละเอียดจนให้เกิดผิวเป็นมัน จากนั้นจะมีการกัดด้วยสารเคมีทำให้เกิดเป็นรอยโครงสร้างที่ขอบเกรนขึ้นหรือกัดให้ผิวของแต่ละผลึกให้สามารถมองเห็นได้ด้วยการส่องแสงฟ้าไปกระทบผิวชิ้นทดสอบและสะท้อนออกมาแตกต่างกันการมองตรวจสอบวิธีนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของเกรนจากขนาดรูปร่างของเกรน เช่น เกรนหยาบ หรือ ละเอียด การเกิดระนาบคู่ (Twin plane) รูปเข็ม รูปทรงกลม

การหาประเภทของเม็ดเกรน โครงสร้างเกรนจากการหล่อ จากการอบอ่อน จากการชุบแข็ง จากการอบชุบ โชนคาร์บอน โชนไนไตรด์ โชนความตึกของความแข็ง การเปลี่ยนรูป และการก่อตัวใหม่ที่เกรน เช่น ในขณะที่ขึ้นรูปขณะเย็น และการตกผลึกใหม่ ประเภทการแยกตัวและรูปร่างการแยกตัวของโครงสร้างที่เป็นอโลหะ ผลึกมัชฌิม (Intermediate crystal) กลุ่มสตรีโคต

(Steadite) ในเหล็กหล่อเทา การแทรกตัวของซัลไฟต์ในเหล็กกล้าค้ำง่าย การแยกตัวเกล็ดแกรไฟต์ หรือแกรไฟต์รูปกลมในเหล็กหล่อ

การวิเคราะห์โครงสร้างที่แปรสภาพ เช่น โครงสร้างแนวเชื่อมมีโซน โครงสร้างเปลี่ยนแปลง (Transition structure zone)

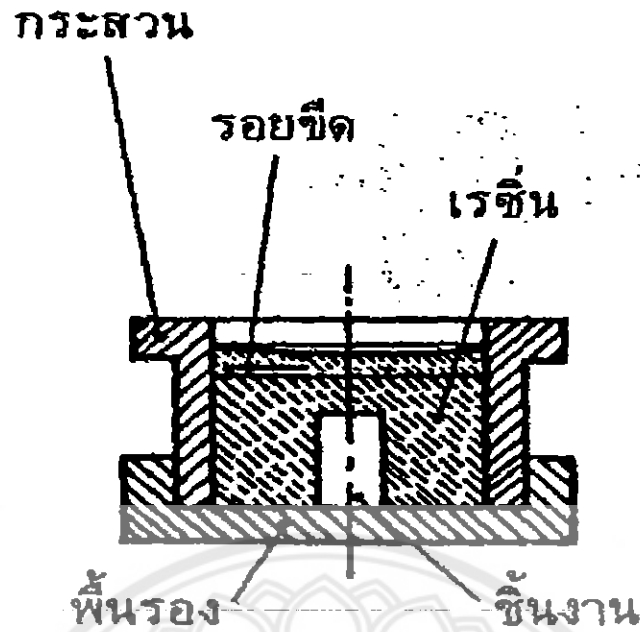
การวิเคราะห์ด้านผิวของโครงสร้าง เช่น โชนแข็งที่ได้รับความร้อนมากเกินไป การแยกตัว การลดคาร์บอนบนผิวเหล็ก ในช่วงจุดภาค รอยร้าวจุดภาค รูอากาศ การฝังในอโลหะที่ไม่พึงประสงค์ (เช่น ซี้ตะกรัน) การหาอัตราของรูพรุน (Degree of porosity) ในชิ้นส่วนเล็กๆ หรือสลัดซ์ข้อ

การวิเคราะห์การแปรสภาพของโครงสร้างที่อุณหภูมิสูง เช่น การแปรสภาพของมาร์เตนไซต์ที่เมตอลโลสโคป (Metalloscope) กับไฟร์บ็อกซ์ (Fire box) ใช้หาขั้นของการขึ้นรูป (Degree of forming) ในวัสดุที่สำเร็จรูปพรรณที่ขึ้นรูปในขณะที่เย็นและของชิ้นส่วน ตามมาตรฐานสมาคมทดสอบวัสดุช่างอเมริกัน (ASTM) ที่ได้จัดแบ่งมาตรฐานกำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์ไว้ดังนี้คือ กำลังขยาย (Magnification) 50 : 1 100 : 1 200 : 1 500 : 1 1000 : 1 กำลังขยาย 50 : 1 (50 เท่า ลงมา) สำหรับโครงสร้างมหภาค กำลังขยาย 100 : 1 ใช้วิเคราะห์การฝังในของอโลหะ (เช่น การกระจาย การแยกตัวของแกรไฟต์ในเหล็กหล่อเทา ริวรอยซี้ตะกรัน (Slag streak) ในเหล็กกล้า กำลังขยาย 500 : 1 และกำลังขยาย 1000 : 1 จะใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างจุดภาคเป็นพิเศษ

ชนิดของกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscopes) เป็นอุปกรณ์ใช้แสงอย่างหนึ่ง มีเลนส์อย่างน้อย 1 ชิ้นจะใช้กำลังขยาย 500 ไมคอน เพื่อทำการขยายภาพวัตถุที่วางในระนาบโฟกัสของเลนส์นั้นๆ

2.6.1 การเตรียมขัดผิวชิ้นทดสอบ

การเตรียมกระทำโดยการตัด กรณีเป็นวัสดุแท่ง (เหล็กกล้า โลหะไม่แข็งเหล็ก) ด้วยการใส่ แก๊สตัดหรือเลื่อยตัดหล่อเป็นด้วยน้ำหรือน้ำมันหล่อเย็น กรณีโลหะแผ่นให้ตัดขวางกับแนวเชื่อม กรณีเหล็กกล้าชุบแข็ง เหล็กหล่อให้ใช้แผ่นตัดทำจากคลอไรด์ โลหะหล่อจะเตรียมจากการหล่อขึ้นรูปเสมอ ขนาดชิ้นงานมีขนาดค้ำรูป สำหรับชิ้นทดสอบที่มีขนาด ϕ เล็กกว่า 10 mm โลหะแผ่นหนาต่ำกว่า 10 mm โลหะแผ่นหนาท่ำกว่า 10 mm หรือชิ้นงานเล็กจะต้องมีการเทหล่อเรซินหุ้มชิ้นงานให้มีขนาดโตขึ้นพอเหมาะกับการจับ โดยประมาณ ϕ 50 mm เรซินใช้ประกอบด้วยส่วนประสม 2 ชนิดคือ เรซินและสารทำให้แข็ง (Hardener) โดยนำมาผสมเข้าด้วยกัน (เรซินจะเหลวผ่านสารทำให้แข็ง จะเป็นของเหลวหรือของแข็ง) โดยเวลาแข็งตัวจะอยู่ระหว่าง 6 ถึง 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง

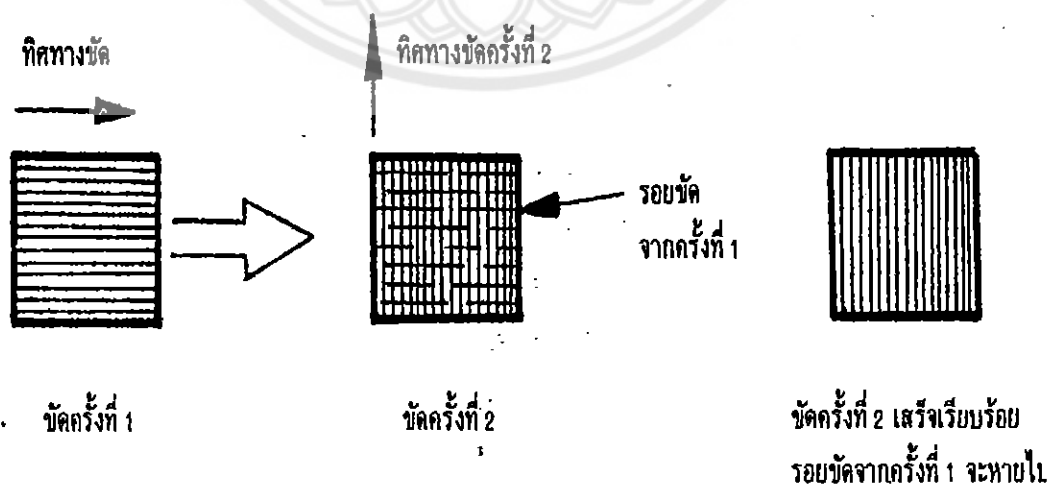


รูปที่ 2.32 การเทเรซินหุ้มชิ้นทดสอบ

ที่มา : มานพ ต้นตระกูล (2540). งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม. (หน้า 177)

2.6.2 การขัดผิวละเอียด (Fine grinding)

การขัดชิ้นงานจะใช้กระดาษทรายขัดเหล็ก (ทำด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์) ขัดด้วยน้ำ เม็ดเบอร์ 180, 320, 500, 800 และ 1000 ตามลำดับ โดยการขัดกระดาษทรายเบอร์สอง สุดท้ายต้องขัดให้เกิดรอยกระดาษทรายในทิศทางเดียวตลอดผิวงาน แล้วหมุนชิ้นงานไป 90 องศาเซลเซียส ขัดจนรอยเดิมหายไปดังรูปที่ 2.32



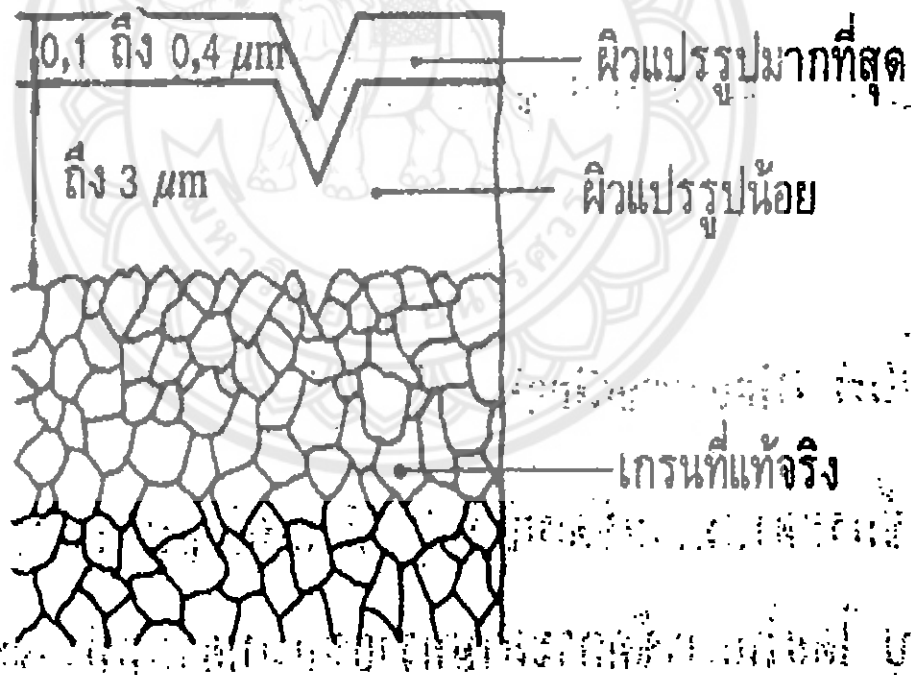
รูปที่ 2.33 การขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายสองเบอร์สุดท้าย

ที่มา : มานพ ต้นตระกูล (2540). งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม. (หน้า 178)

ในการขัดจะขัดบนแท่นที่มีความเรียบ เช่น บนแผ่นกระจกหนา (หากผิวไม่เรียบจะทำให้ภาพจากการวิเคราะห์โครงสร้างผิดพลาดได้) งานปราศจากผิวรอยข่วนเล็กๆกระต่ายทรายขัดผิว และวิธีการที่กล่าวมานี้ ใช้ในการขัดผิว สำหรับโลหะเหล็ก โลหะที่มีทองแดงเป็นหลักแมกนีเซียม เจือและส่วนเจือจากตะกั่ว ดีบุก และสังกะสี ชิ้นงานที่เป็นเหล็กหล่อเหนียว (แกรไฟต์กลม) จะต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษ เพราะมักเกิดปัญหาแกรไฟต์กลมหลุดจากผิวขัดได้ง่าย ในระหว่างการขัดผิว ทำให้ภาพโครงสร้างที่ได้ผิดพลาดไป

2.6.3 การขัดผิวมัน (Polishing)

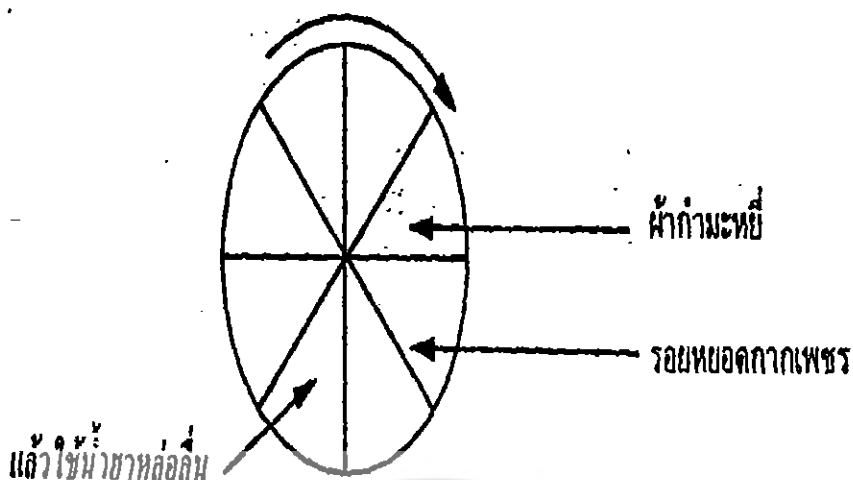
หลังจากขัดกระต่ายทรายแล้ว จะนำชิ้นงานมาขัดบนผ้าสักหลาด (มีเกรดเดียว) เป็นงานหมุนขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ (Polisher) ความเร็ว รอบ 300 รอบต่อนาที สารที่ใช้ในการขัดจะประกอบด้วย น้ำยาหล่อลื่น (เป็นส่วนผสมของน้ำ 400 ซีซี น้ำสบู่เหลว 10 ซีซี น้ำมันซลูเบิล (Soluble) 10 ซีซี กรดที่ เป็นเหล็กแข็งจะใช้ ปาสเตอร์กากเพชร (Diamond pastes) ที่มีขนาดเม็ด $\frac{1}{4} \mu\text{m}$ หยอดลงบนงานขัด ก่อน



รูปที่ 2.34 ผิวแปรรูปก่อนการขัดผิว

ที่มา : มานพ ตันตระบัณฑิตย์(2540). งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม. (หน้า 178)

โดยปกติจะนิยมใช้ผงอะลูมินา (Aluminium oxide) แมกนีเซียม (Magnesium oxide) ไครมิกออกไซด์เฟอร์ริกออกไซด์ หล่อลื่นด้วยน้ำ



เวลาประมาณ 10 วินาที → ล้างด้วยน้ำ → เป่าด้วยลมร้อนให้แห้งสนิท

รูปที่ 2.35 การใส่สารซักบนงานผ้าสักหลาด

ที่มา : มานพ ต้นตระกูลบัณฑิตย์(2540). งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม. (หน้า 179)

ผงอะลูมินาที่ใช้โดยทั่วไปจะมีขนาดเม็ดระหว่าง 15-0, 3 μm เป็น α -อะลูมินา ใช้ขัดในคอนเริ่มต้นเมื่อขัดผิวเรียบสำเร็จ จะใช้ Y-อะลูมินาที่มีขนาดเล็กประมาณ 0.05 μm

การกัดผิวงานด้วยกรด(Etching) หลังการขัดผิวมันแล้วจะนำมาล้างทำความสะอาดด้วยอีทิล หรือเมทิลแอลกอฮอล์มีความเข้มข้น 96% แล้วเป่าให้แห้ง จากนั้นนำชิ้นทดสอบมาทำการกัดผิวด้วยกรด กรดจะกัดผิวงานเป็น 2 ลักษณะเมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์

ลักษณะที่ 1 กรดกัดตำแหน่งขอบเกรน ให้เป็นร่อง (เป็นบริเวณที่เม็ดเกรนทุก 2 เม็ดเกรนมาชนกัน) ดังนั้นลำแสงที่ฉายตกกระทบลงในร่องเกิดเป็นเงาดำ (ไม่สะท้อนกลับ) เป็นเส้นขอบเกรนให้เป็นปรากฏในช่องตามองคังรูป

ลักษณะที่ 1 กรดกัดตำแหน่งผิวหน้าเกรน ทำให้เกิดสีต่างกัน ในเม็ดเกรนต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจาก สารกัดผิวที่ทำให้เกิดชั้นออกไซด์ขึ้นและก็เป็นไปได้ที่ทุกเกรนถูกทำให้เกิดความหยาบ ทำให้การสะท้อนของลำแสงแตกต่างกัน

จึงสรุปได้ว่าการใช้กรดกัดผิวงาน จะทำให้สามารถมองเห็น โครงสร้างพื้นฐาน (Matrix) ขอบเกรนได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้และผิวทดสอบบางชนิด เช่นเหล็กหล่อเทาจะไม่มีกรดกัดกรดบนผิว เนื่องจากในบางครั้งไม่มีความจำเป็นที่จะดูโครงสร้างพื้นฐานแต่ต้องการดูชนิดหรือรูปร่าง และขนาดของเกล็ดแกรไฟต์เท่านั้น

2.7 การวิเคราะห์เพื่อหาตัวแปรที่มีผลการอบปกติ (Analysis of Variance : ANOVA)

2.7.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว(One-way ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว เป็นการทดสอบโดยพิจารณาเลือกปัจจัยเพียงปัจจัยเดียวจากหลาย ๆ ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองมากที่สุด แล้วนำมาทำการทดสอบที่วิธีการทดสอบ (Treatment) ที่แตกต่างกัน แล้วพิจารณาว่าปัจจัยที่นำมาพิจารณานั้นมีผลกระทบต่อผลการทดลองหรือไม่

ตัวอย่าง วิศวกรโรงงานสันนิษฐานว่าปัจจัยที่น่าจะมีผลกระทบต่อแรงดึงในเส้นใย คือ อุณหภูมิ %cotton และแสงสว่าง และจากทั้ง 3 ปัจจัยนี้วิศวกรโรงงานคาดว่า %cotton น่าจะเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อแรงดึงในเส้นใยมากที่สุด จึงได้ทำการทดสอบว่า %cotton มีผลแรงดึงในเส้นใยหรือไม่ จึงได้ทำการทดสอบโดยการผลิตเส้นใยด้วย %cotton ที่แตกต่างกัน (Treatments) คือ %cotton ที่ 15 20 25 30 และ 35 ($k=5$) จากนั้นทำการสุ่มตัวอย่างจากการผลิตที่ระดับต่าง ๆ ระดับละ n_1, n_2, n_3, n_4 และ n_5 จากนั้นทำการวัดค่าแรงดึงของตัวอย่างแต่ละตัวอย่าง (Observations) แล้วทดสอบสมมติฐานแสดงการทดลองประเภทวิเคราะห์ปัจจัยเดียว (Experiments with single factor)

ตารางที่ 2.6 แสดงค่าตัวแปร ANOVA

treatment	observations				total	average
1	y_{11}	y_{12}	.....	y_{1n}	$y_{1.}$	$y_{1.}$
2	y_{21}	y_{22}	.....	y_{2n}	$y_{2.}$	$y_{2.}$
k	y_{k1}	y_{k2}	.....	y_{kn}	$y_{k.}$	$y_{k.}$
	$y_{..}$					$y_{..}$

จากรูปเป็นการทดลอง 1 ปัจจัย ประกอบด้วย k treatments แต่ละ treatment ประกอบด้วย n observations

y_{ij} = ค่าสังเกต (Observations) จากวิธีปฏิบัติที่ i ตัวอย่างที่ j

y_i = ผลรวมของค่าสังเกต (Observation) ทุกค่าในวิธีปฏิบัติที่ i

\bar{y}_i = ค่าเฉลี่ยของค่าสังเกต (Observation) ในวิธีปฏิบัติที่ i

y = ผลรวมของค่าสังเกต (Observation) ทั้งหมดในการทดลอง

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับหนึ่งปัจจัย

1. ตั้งสมมติฐาน

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k$$

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อย 1 คู่ หรือ } H_1 : \mu_i \neq \mu_j \text{ เมื่อ } i \neq j$$

2. ความแปรปรวนรวม (Total Sum of Squares : SS_T) ความแปรปรวนรวมในการทดลอง จะเกิดมาจาก 2 แหล่ง คือ ความแปรปรวนที่เกิดวิธีปฏิบัติ (Treatment Sum of Squares : SS_{treat}) และ ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในกลุ่ม (Error Sum of Square : SS_E) โดยที่

$$SS_T = SS_{treat} + SS_E \quad (2.2)$$

$$SS_T = \sum \sum y_{ij}^2 - \frac{y^2}{N} \quad (2.3)$$

$$SS_{treat} = \sum \sum \frac{y_i^2}{n} - \frac{y^2}{N} \quad (2.4)$$

$$SS_E = SS_T - SS_{treat} \quad (2.5)$$

เมื่อ N คือจำนวนค่าสังเกตทั้งหมด

n คือ จำนวนค่าสังเกตในวิธีปฏิบัติที่ i

3. นำค่า SS_{treat} , SS_E และ SS_T จากข้อ 2. มาสร้างตาราง ANOVA

ตารางที่ 2.7 ตารางค่าตัวแปร ANOVA แบบทางเดียว

source	SS	df	MS	F_c
Between treatments	SS_{treat}	$k-1$	$\frac{SS_{treat}}{k-1}$	$\frac{MS_{treat}}{MS_E}$
Error(with in treatment)	SS_E	$N-k$	$\frac{SS_E}{N-k}$	
Total	SS_T	$N-1$		

ที่มา : //km.nurse.cmu.ac.th/mngt/innovation/.../lesson_08A.doc

$F_{\text{ตาราง}} = F_{\alpha, k-1, N-k}$ (ได้จากการเปิดตารางสถิติ F ที่ระดับนัยสำคัญ α องศาเสรี $k-1, N-k$)

4. วิเคราะห์ผล โดย

4.1 ถ้า $F_c > F_{\alpha, k-1, N-k}$ ให้ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1

4.2 ถ้า $F_c < F_{\alpha, k-1, N-k}$ ให้ยอมรับ H_0 ปฏิเสธ H_1

5. สรุปผลการทดสอบ

2.7.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน 2 ทาง (Two-way ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน 2 ทาง เป็นการทดสอบโดยพิจารณาเลือกปัจจัย 2 ปัจจัยพร้อมกัน จากหลาย ๆ ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองมากที่สุด แล้วนำมาทำการทดสอบที่วิธีการทดสอบ (Treatment) ที่แตกต่างกัน แล้วพิจารณาว่าปัจจัยที่นำมาพิจารณานั้นมีผลกระทบต่อผลการทดลองหรือไม่

ตารางที่ 2.8 แสดงการทดลองการวิเคราะห์ความแปรปรวน 2 ทาง

Factor A	Factor B							
	1		2		1		total	
1	y_{111}	y_{112}	y_{121}	y_{122}	.....	y_{111}	y_{112}	$y_{1..}$
	...	y_{11n}	...	y_{12n}	.....	...	y_{11n}	
2	y_{211}	y_{212}	y_{221}	y_{222}	.....	y_{211}	y_{212}	$y_{2..}$
	...	y_{21n}	...	y_{22n}	.....	...	y_{21n}	
:	:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:	:
k	y_{k11}	y_{k12}	y_{k21}	y_{k22}	.....	y_{k11}	y_{k12}	$y_{k..}$
	...	y_{k1n}	...	y_{k2n}	.....	...	y_{k1n}	
	$y_{.1.}$		$y_{.2.}$		.....	$y_{.1.}$		$y_{...}$

ที่มา: //km.nurse.cmu.ac.th/mngt/innovation/.../lesson_08A.doc

จากตารางเป็นการทดลอง 2 ปัจจัย คือ ปัจจัย A ซึ่งประกอบด้วย k treatments; ปัจจัย B ซึ่งประกอบด้วย l treatments แต่ละ treatment มี n observations และมีจำนวนข้อมูลทั้งหมด $N = kln$

y_{ij^n} = ค่าสังเกตที่ n จากวิธีปฏิบัติที่ i ปัจจัย A จากวิธีปฏิบัติที่ j ปัจจัย B

$y_{i..}$ = ผลรวมของค่าสังเกต ln ค่าในวิธีปฏิบัติที่ i ปัจจัย A

$y_{.j.}$ = ผลรวมของค่าสังเกต kn ค่าในวิธีปฏิบัติที่ j ปัจจัย B

$y_{ij.}$ = ผลรวมของค่าสังเกต n ค่าในวิธีปฏิบัติที่ i ปัจจัย A วิธีปฏิบัติที่ j ปัจจัย B

$y_{...}$ = ผลรวมของค่าสังเกตทุกค่า ($N = kln$) ในการทดลอง

การวิเคราะห์ความแปรปรวน 2 ทาง

1. ตั้งสมมติฐาน

$$H_0 : (\beta)_{ij} = 0$$

$$H_1 : (\beta)_{ij} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

2. ความแปรปรวนรวม (Total Sum of Squares: SS)

$$SS_T = SS_A + SS_{B+SS} + SS_E$$

$$\text{โดย } SS_T = \sum \sum y_{ijn}^2 - \frac{y^2}{N}$$

$$SS_A = \sum \sum \frac{y_{in}^2}{I_n} - \frac{y^2}{N}$$

$$SS_B = \sum \sum \frac{y_{jn}^2}{k_n} - \frac{y^2}{N}$$

$$SS_{\text{subtotal}} = \sum \sum \frac{y_{ij}^2}{N} - \frac{y^2}{N}$$

$$SS_{AB} = SS_{\text{subtotal}} - SS_A - SS_B$$

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_{B+SS} - SS_{AB}$$

3. นำค่า SS_A , SS_B , SS_{AB} , SS_E และ SS_T จากข้อ 2. มาสร้างตาราง ANOVA

ตารางที่ 2.9 ค่าตัวแปร ANOVA แบบสองทาง

source	SS	df	MS	F _c
A	SS_A	k-1	$\frac{SS_A}{(k-1)}$	$\frac{MS_A}{MS_E} *$
B	SS_B	l-1	$\frac{SS_B}{(l-1)}$	$MS_{E/BMS} **$
Interaction AB	SS_{AB}	(k-1)(l-1)	$\frac{SS_{AB}}{(k-1)(l-1)}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_E} **$
Error	SS_E	(kl)(n-1)	$\frac{SS_E}{(kl)(l-1)}$	
Total	SS_T	N-1		

ที่มา : //km.nurse.cmu.ac.th/mngt/innovation/.../lesson_08A.doc

$$F^*_{\text{การชน } \alpha, k-1, (k)(n-1)} = F \quad ; \quad F^*_{\text{การชน } \alpha, k-1, (k)(n-1)} = F \quad ; \quad F^*_{\text{การชน } \alpha, (k-1)(k-1), (k)(n-1)} = F$$

4. วิเคราะห์ผลโดย

$$4.1 \text{ ถ้า } F^*_{\text{การชน } \alpha, k-1, (k)(n-1)} > F \quad ; \text{ ให้ปฏิเสศ } H_0 \text{ ยอมรับ } H_1 \text{ ปังจัย } A \text{ มีผลกระทบ}$$

$$4.2 \text{ ถ้า } F^*_{\text{การชน } \alpha, k-1, (k)(n-1)} > F \quad ; \text{ ให้ปฏิเสศ } H_0 \text{ ยอมรับ } H_1 \text{ ปังจัย } B \text{ มีผลกระทบ}$$

$$4.3 \text{ ถ้า } F^*_{\text{การชน } \alpha, (k-1)(k-1), (k)(n-1)} > F \quad ; \text{ ให้ปฏิเสศ } H_0 \text{ ยอมรับ } H_1 \text{ ปังจัย } AB \text{ มีผลกระทบ}$$

5. สรุปผลการทดสอบ

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการขึ้นรูปเป็นของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงด้วยวิธีการรีดลดความหนาแผ่นขึ้นงาน

ดำเนินงานวิจัยโดย อนรรฆ ชันชะชวน, พงศ์พันธ์ แก้วตาที, ณัฐนันท์ มูลสระคู, คมกริช ละวรรณวงษ์, วารุณี เปรมานนท์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราส่วนการขึ้นรูปเป็นของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงด้วยวิธีการรีดลดความหนาแผ่นขึ้นงาน เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วน การรีดลดความหนาที่มีผลต่อสมบัติพื้นฐานของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ซึ่งได้แก่ สมบัติทางกลและทางโลหะวิทยา โดยใช้กระบวนการรีดลดความหนาขึ้นงานในสภาวะใช้สารหล่อลื่น วัสดุขึ้นงาน คือ เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง เกรด SAPH440 และ SPFH590 ขนาด 15X0.8X200 มิลลิเมตร กำหนดให้มีอัตราส่วนการขึ้นรูปเป็นในช่วง 15 เปอร์เซ็นต์ ถึง 45 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ความเร็วในการดึงเท่ากับ 30 มิลลิเมตรต่อนาที จากผลการทดลองพบว่าวัสดุเกรด SAPH440 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการขึ้นรูปเป็นจะทำให้วัสดุมีความแข็งแรงครากและความแข็งแรงดึงสูงสุดมากเพิ่มขึ้น ซึ่งในอัตราส่วนของการขึ้นรูปเป็นเท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งแรงครากและความแข็งแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้นกว่า กรณีไม่ผ่านการขึ้นรูปถึง 85.9 เปอร์เซ็นต์ และ 39.4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนวัสดุเกรด SPFH590 ก็มีแนวโน้มผลการทดลองเช่นเดียวกัน โดยในอัตราส่วนการขึ้นรูปเป็นเท่ากับ 45 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งแรงครากและความแข็งแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้นกว่ากรณีไม่ผ่านการขึ้นรูปถึง 62.1 เปอร์เซ็นต์ และ 28.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคพบว่า เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงทั้งสองชนิดมีส่วนผสมของคาร์บอนไม่เท่ากัน ของแมงกานีสและซิลิกอนที่มีมากกว่าปกติ นอกจากนั้นยังพบความแตกต่างของขนาดเกรนในวัสดุทั้งสองชนิดด้วย ซึ่งช่วยอธิบายกลไกการเพิ่มความแข็งแรงของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงได้

2.8.2 ผลของการรีดเย็น การอบไฮโมจิในเซชัน และ อุณหภูมิการอบอ่อนต่อสมบัติเชิงกลของ อะลูมิเนียมชนิดแผ่น AA8006 (Al-Fe-Mn-Si)

คำนิพนงานวิจัยโดย สิริวรรณ สกุลคันเจริญชัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบจากกระบวนการเชิงความร้อน และเชิงกล ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมชั้นคุณภาพ AA8006 ชิ้นงาน ซึ่งผลิตจากกระบวนการหล่อแบบทวิน โรล์ที่มีความหนาเริ่มต้น 6.5 มิลลิเมตร โดยนำแผ่นตัวอย่าง มาผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่อุณหภูมิ 550 และ 580 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงและนำมา รีดเย็นที่อัตราการรีดเย็นตั้งแต่ 61 จนถึง 92 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นชิ้นงานถูกนำไปอบอ่อนที่ อุณหภูมิ 270, 300 และ 380 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงการศึกษานี้ของอนุภาคสำหรับ ชิ้นงานหลังการอบไฮโมจิในเซชัน ได้รับการวิเคราะห์โดยเทคนิคการทำละลายและเทคนิคเอกซเรย์ คิฟแฟรคชัน โครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏ ได้รับการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสะท้อนแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด จากผลการศึกษาพบว่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเฟส ที่สองจาก Coarse Interdendritic ไปเป็นอนุภาคนขนาดเล็กหลังจากการอบไฮโมจิในเซชันที่ 550 และ 580 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลให้เกิดการลดลงของสมบัติเชิงกลจากการทดสอบแรงดึงเนื่องจากการ ตกผลึกใหม่ ซึ่งสนับสนุนโดยกลไก Particle Stimulated Nucleation (PSN) โครงสร้างการตกผลึก ใหม่แบบ full recrystallization จะพบในชิ้นงานที่ผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่ระดับการรีดเย็น 61 เปอร์เซ็นต์ ถึง 83 เปอร์เซ็นต์ และผ่านการอบอ่อน 380 องศาเซลเซียส การตกผลึกใหม่เฉพาะจุด และ abnormal grain growth เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่มีอัตราการรีดเย็น 92 และ 97 เปอร์เซ็นต์ ในทุกอุณหภูมิของการอบอ่อน เนื่องจากการเพิ่มแรงผลักดัน (Driving Force) สำหรับกระบวนการตกผลึกใหม่และสถานะคืนตัวที่ได้จากการเพิ่มอุณหภูมิอบอ่อนและการรีดเย็น การทดลองพบว่า ชิ้นงานที่มีสมบัติเชิงกลและความสามารถในการแปรรูปดีจะมีโครงสร้างใน สถานะคืนตัว (Recovery) และเป็นชิ้นงานประเภทที่ไม่ผ่านการอบไฮโมจิในเซชันเนื่องจากผลของ กลไกการเกิดอนุภาคนขนาดเล็กในช่วงการอบอ่อนซึ่งขัดขวางการตกผลึกใหม่ (Zener Drag) ดังนั้น กลไก PSN จึงเป็นกลไกหลักที่เกิดในชิ้นงานที่ผ่านการอบไฮโมจิในเซชัน และมีโครงสร้างสุดท้าย ขนาดใหญ่ ส่วนผลของกลไก Zener Drag จะเกิดในชิ้นงานประเภทไม่ผ่านการอบไฮโมจิในเซชัน ส่งผลให้เนื้อโลหะมีความต้านทานการอบอ่อนและเนื้อโลหะมีการเติบโตของเกรน (Grain Growth) ส่งผลให้โครงสร้างสุดท้ายละเอียด ไม่มีการเกิดผลึกขนาดใหญ่

2.8.3 อิทธิพลของอุณหภูมิการชุบและส่วนผสมทางเคมีต่อโครงสร้าง และคุณสมบัติของเหล็กหล่อเหนียว ADI

คำนิยามงานวิจัยโดย นุชธนา พูลทอง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาเทคโนโลยีวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

เหล็กหล่อเหนียว ADI เป็นกลุ่มของเหล็กหล่อที่มี คุณสมบัติร่วมระหว่างความเหนียวและความแข็งแรง จากคุณสมบัติทางกลดังกล่าวนี้ทำให้มีการนำมาใช้งานทางวิศวกรรมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยนำมาใช้แทนเหล็กกล้าและเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบขึ้นรูป ทั้งนี้เนื่องจากมีข้อดีในการผลิตมากกว่าเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบขึ้นรูป คือสามารถประหยัดพลังงาน ในการผลิตลงได้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ สามารถลดน้ำหนักลงได้ 10 เปอร์เซ็นต์ และประหยัด ค่าใช้จ่ายได้ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่คุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกัน งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยในการหล่อคือ ขนาดของชิ้นงานและส่วนผสมทางเคมีต่อโครงสร้างและคุณสมบัติของ เหล็กหล่อเหนียว ADI อิทธิพลของอุณหภูมิในการอบให้เป็น ออสเทนไนท์ อุณหภูมิและเวลาในการทำออสเทมเปอร์ริงต่อ โครงสร้าง และคุณสมบัติของเหล็กหล่อเหนียว ADI และอิทธิพลของส่วนผสม ทางเคมีต่อความสามารถในการทำออสเทมเปอร์ริง ผลจากการวิจัย พบว่าอิทธิพลของปัจจัยในการหล่อคือขนาดของชิ้นงานมีผลต่อขนาด การกระจายของกราไฟท์ และมีผลต่อโครงสร้างพื้นฐานของชิ้นงาน โดยชิ้นงานขนาดเล็กจะมีโครงสร้างที่ละเอียด มีขนาดกราไฟท์ เล็ก มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นเฟิร์ดไลท์มากกว่าในชิ้นงานใหญ่ ซึ่งในชิ้นงานหล่อที่มีธาตุผสมคือ นิกเกิลหรือ โมลิบดีนัมเพิ่มขึ้น โครงสร้างพื้นฐานจะมีปริมาณเฟิร์ดไลท์เพิ่มขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิในการอบทำให้เป็นออสเทนไนท์ เป็นผลให้อัตราการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างช้าลงทำให้เบไนท์ที่ได้มีลักษณะหยาบ การเพิ่มอุณหภูมิ ในการทำออสเทมเปอร์ริงสูงกว่าอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส จะทำให้ได้โครงสร้างที่เป็นเบไนท์บน ถ้าทำการออสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 350 องศาเซลเซียส จะได้โครงสร้างเป็นเบไนท์ล่าง คุณสมบัติทางกลที่ดีที่สุด ของเหล็กหล่อเหนียว ADI ขึ้นอยู่กับเวลาในการทำออสเทมเปอร์ริงค่อนข้างวิกฤต จากการทดลองพบว่าชิ้นงานหน้า 2.5 มิลลิเมตร ใช้เวลาใน การทำออสเทมเปอร์ริงประมาณ 1.5 ชั่วโมง อิทธิพลของนิกเกิลและ โมลิบดีนัมต่อความสามารถในการทำออสเทมเปอร์ริงขึ้นกับขนาดของชิ้นงาน พบว่าเมื่อชิ้นงานมีขนาดเกินกว่า 18 มิลลิเมตร ทำการอบชุบในเตาเกลือ ควรเติมนิกเกิล และ/หรือ โมลิบดีนัมเพื่อหลีกเลี่ยงการแตกร้าวขณะอบชุบของชิ้นงาน โดยเติมนิกเกิลประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ หรือ โมลิบดีนัมประมาณ 0.4 - 0.6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะช่วยให้ได้ชิ้นงานที่มีโครงสร้างสม่ำเสมอมากขึ้นและไม่เกิดการแตกร้าวของชิ้นงานในขณะอบชุบ ชิ้นงานที่เย็นตัวในอากาศสามารถทำให้เป็นแบบเบไนท์ได้ถ้ามีธาตุผสมในปริมาณที่พอเหมาะ โดยถ้าเติมในปริมาณมากเกินไปจะได้โครงสร้างเป็นแบบ เบไนท์-มาร์เทนไซต์ แต่ถ้าเติมน้อยเกินไปจะได้ เฟิร์ดไลท์-เบไนท์ ปริมาณที่เหมาะสมสำหรับชิ้นงานขนาด 18 มิลลิเมตร คือ ร้อยละ 2 ของNi หรือ ร้อยละ 0.6 ของMo และ ร้อยละ 4 ของNi หรือ ร้อยละ 0.8 ของMo สำหรับชิ้นงานที่มีขนาด 25 มิลลิเมตร

คุณสมบัติ ทางกลของเหล็กหล่อเหนียว ADI ที่ผลิตได้มีค่าใกล้เคียงกับ เหล็กกล้า คือมีความแข็งแรงอยู่ในช่วง 315-464 HB และความแข็งแรงอยู่ในช่วง 675-1018 MPa ชิ้นงานที่ทำออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งแรงสูงกว่าชิ้นงานที่ทำออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส และ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ได้จากการทดลอง คือ 1018 MPa ชิ้นงานที่อบให้เป็นออสเทนไนท์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จะให้ความแข็งแรง สูงกว่าชิ้นงานที่อบให้เป็นออสเทนไนท์ที่อุณหภูมิ 850 และ 1000 องศาเซลเซียส เมื่อทำการออสเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส (879 MPa) ชิ้นงานที่มีนิเกิลเป็นธาตุผสมให้ค่าความแข็งแรง สูงสุดที่ร้อยละ 2 ของNi (865 MPa) และชิ้นงานที่มีโมลิบดีนัมเป็น ธาตุผสมให้ค่าแรงดึงสูงกว่า 900 MPa เมื่อมีปริมาณ โมลิบดีนัม ไม่เกิน 0.6 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบเป็นออสเทน-ไนท์ และอุณหภูมิในการทำออสเทมเปอร์ที่ดีที่สุดอยู่ที่ 900 องศาเซลเซียส และ 300-350 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การเติมธาตุผสมประมาณ ร้อยละ 2 ของNi และ ร้อยละ 0.6 ของMo จะเพิ่มความสามารถ ในการทำออสเทมเปอร์ ของชิ้นงานหนา

2.8.4 อิทธิพลของอุณหภูมิอบชุบที่มีผลต่อโครงสร้างและคุณสมบัติทางกลของเหล็ก AISI 4140

ดำเนินงานวิจัยโดย นาย วศัญญ์ อรรถาเวช , นาย สมศักดิ์ โพธิสุวรรณ และ นาง สางสุภักดิ์ จำรัสทอง คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนเรศวร

ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิอบชุบที่มีผลต่อโครงสร้างและคุณสมบัติทางกลของเหล็ก AISI 4140 โดยทำการทดสอบวัสดุ และวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยวิธีทางสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอบชุบ และอัตราการเย็นตัวของสารชุบที่มีผลต่อความแข็ง ความทนต่อแรงกระแทก ความทนต่อแรงดึง โมดูลัสความยืดหยุ่น เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น รวมทั้งศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กที่ผ่านกระบวนการอบชุบ ผลลัพธ์ของการศึกษาพบว่าความแข็งแรงจะแปรผันตรงกับอัตราการเย็นตัว และแปรผกผันกับอุณหภูมิอบชุบ และอุณหภูมิการอบคืนไฟ ความทนต่อแรงกระแทกจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิอบชุบ อุณหภูมิการอบคืนไฟ และอัตราเย็นตัวของสารอบชุบ ความทนต่อแรงดึงจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิอบชุบ อุณหภูมิการอบคืนไฟ และอัตราเย็นตัวของสารอบชุบ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิอบชุบ อุณหภูมิการอบคืนไฟ และอัตราเย็นตัวของสารอบชุบ เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นจะไม่มีผลต่ออุณหภูมิอบชุบ แต่จะแปรผันตรงกับอุณหภูมิของการอบคืนไฟและแปรผกผันกับอัตราการเย็นตัวของสารชุบ โครงสร้างจุลภาคจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิอบชุบ อุณหภูมิการอบคืนไฟ และอัตราเย็นตัวของสารอบชุบ

2.8.5 การศึกษาตัวแปรในการอบชุบที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาค

ดำเนินงานวิจัยโดย นางสาวทิพวรรณ แม้นเจริญ และนายศักดิ์ชัย เค่นนิศิริศรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ได้ศึกษาตัวแปรในการชุบแข็งที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค โดยทำการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการคำนวณทางสถิติ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง และความทนต่อแรงกระแทก กับตัวกลางที่ใช้ในการชุบแข็ง และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบชุบ รวมทั้งศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งในสภาวะต่าง ๆ ผลลัพธ์ของการศึกษาพบว่า อุณหภูมิและการเย็นตัวมีผลกระทบต่อความแข็ง ความทนต่อแรงกระแทก และโครงสร้างจุลภาค โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบชุบแปรผกผันกับความแข็ง แต่แปรผกผันกับความทนต่อแรงกระแทก และขนาดของเม็ดเกรน ยกเว้นการชุบแข็งในน้ำมันอุณหภูมิไม่มีผลต่อความทนต่อแรงกระแทก โดยความทนต่อแรงกระแทกที่ได้จากการชุบแข็งในน้ำมันจะใกล้เคียงกับความทนต่อแรงกระแทก ก่อนการชุบแข็ง

2.8.6 การทดสอบความแข็งของวัสดุผสมอะลูมิเนียมเมทริกซ์เสริมแรงด้วยเส้นใยนาโนซิลิคอนคาร์ไบด์-อะลูมินา

ดำเนินงานวิจัยโดย ไพศาล ดวงจักร์ ณ.อยุธยา, อัมพล วงศ์จรัส และพิศิษฐ์ สิงห์ใจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ได้ศึกษาวิจัยนี้ได้ทดสอบความแข็งของอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยนาโนซิลิคอนคาร์ไบด์อะลูมินาที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า ได้ทดลองโดยการอัดแท่งผงอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ผสมกับเส้นใยนาโนในอัตราส่วน 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส 10 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนาโนซิลิคอนคาร์ไบด์-อะลูมินามีค่า ความแข็งเพิ่มขึ้นประมาณ 170 เปอร์เซ็นต์

Number	Hardness (HV30)				
	Pure Aluminium		SiC-Al ₂ O ₃ fibers(20wt.%) + Al matrix		
	(#1)	(#2)	(#3)	(#4)	(#5)
1	13	6	38	35	26
2	19	6	61	27	27
3	21	18	28	23	43
4	10	15	-	30	41
5	6	-	15	44	41
Average	13.8	11.25	35.5	31.8	35.6

รูปที่ 2.36 ผลลัพธ์ของการศึกษางานวิจัย

ที่มา :ไพศาล ดวงจักร์ ณ.อยุธยา,อำพล วงศ์จรัส และพิศิษฐ์ สิงห์ใจ งานวิจัยเรื่องการทดสอบความ
แข็ง ของวัสดุผสมอะลูมิเนียมเมทริกซ์เสริมแรงด้วยเส้นใยนาโนซิลิคอนคาร์ไบด์-อะลูมินา

2.8.7 การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้างานเย็นเนื่องจากการอบคืนตัว

ดำเนินงานวิจัยโดย จิรภัทร ลดาวัลย์ ,เฉลิมวัฒน์ วงศ์วณิชวัฒน์ คณะวิทยาศาสตร์ประ
ชุกสาขาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ได้ศึกษาความแข็งและความเค้นตกค้างภายในเป็นสมบัติเชิงกลของเหล็กงานเย็น
สามารถควบคุมได้ จากอุณหภูมิที่ใช้ในขบวนการอบคืนตัว งานวิจัยศึกษาการอบที่อุณหภูมิ 300
องศาเซลเซียส,400 องศาเซลเซียส,500 องศาเซลเซียสและ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้สูญญากาศ
จากผลการทดลองอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะได้ชิ้นงานมีค่าความแข็งมากที่สุดเท่ากับ 61
HRC และที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ชิ้นงานมีค่าความแข็งน้อยที่สุดเท่ากับ 48 HRC โดยที่ทั้ง
สองอุณหภูมิให้ค่าความเค้นตกค้างล่าสุดเท่ากันมีค่าเท่ากับ 359 N/mm² แต่ที่อุณหภูมิ 500 องศา
เซลเซียส เป็นความเค้นอัดและที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นความเค้นยึด ซึ่งชนิดของความเค้น
มีความแข็งมากกว่า ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมใช้ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

2.8.8 อิทธิพลของอุณหภูมิกับการแปรเปลี่ยนค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

ดำเนินงานวิจัย โดย ปกรณ์ แดงละม้าย ,วิรัตน์ จอมขวา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงค่าไปตามอุณหภูมิอันได้แก่ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น, ค่าความแข็งแรงที่จุดครากตัว, ค่าความแข็งแรงสูงสุด และ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของวัสดุ 4 ชนิดที่หาได้ภายในประเทศได้แก่ อลูมิเนียมเกรด 1100, อลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063, เหล็กเกรดเอสที 37 และ เหล็กเกรดเอสที 60 โดยอ้างอิงวิธีการทดลองตามมาตรฐาน ASTM ซึ่งการทดลองจะกระทำที่อุณหภูมิ 3 จุดคือ 25, 100 และ 200 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าอลูมิเนียมเกรด 1100, อลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063, เหล็กเกรดเอสที 37 และ เหล็กเกรดเอสที 60 จะมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (GPa.) ดังนี้ (70.88, 65.54, 54.68), (72.55, 70.20, 61.75); (227.64, 209.82, 192.50), (224.22, 215.34, 200.78) ค่าความแข็งแรงที่จุดครากตัว (MPa.) ดังนี้ (105.28, 99.51, 73.88), (167.13, 166.03, 140.55), (299.93, 278.35, 248.90), (760.76, 735.06, 687.55) และค่าความแข็งแรงสูงสุด (MPa.) ดังนี้ (114.54, 103.73, 77.66), (201.47, 190.67, 146.71), (381.62, 360.19, 330.45), (1106.46, 1083.04, 1035.26) ที่อุณหภูมิ (25 องศาเซลเซียส, 100 องศาเซลเซียส, 200 องศาเซลเซียส) สำหรับผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวอันเนื่องมาจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงของอลูมิเนียมเกรด 1100 ได้เท่ากับ $2.320 \times 10^{-5} \text{ mm/mm. } ^\circ\text{C}$, อลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063 ได้เท่ากับ $2.287 \times 10^{-5} \text{ mm/mm. } ^\circ\text{C}$, เหล็กเกรด ST-37 ได้เท่ากับ $1.329 \times 10^{-5} \text{ mm/mm. } ^\circ\text{C}$ และ เหล็กเกรด ST-60 ได้เท่ากับ $1.323 \times 10^{-5} \text{ mm/mm. } ^\circ\text{C}$ ท้ายสุดของการทำงานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำการคำนวณตัวอย่างเชิงไฟไนต์อีลิเมนต์ เพื่อคำนวณหาค่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นบนแผ่นเพลทอลูมิเนียม 1100 จากสภาวะอุณหภูมิเริ่มต้น 200 องศาเซลเซียส ซึ่งผลปรากฏว่าค่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 1.8732 MPa.

บทที่ 3

วิธีดำเนินการโรงงาน

3.1 ศึกษางานทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- 3.1.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการทดสอบความแข็ง
- 3.1.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการทดสอบแรงดึง
- 3.1.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค
- 3.1.4 ทฤษฎีเกี่ยวกับการอบปกติ (Normalizing)
- 3.1.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับการรีดเย็น (Cold Work)

3.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ (จำนวนชิ้นงานในการทดลองอ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM A 370)

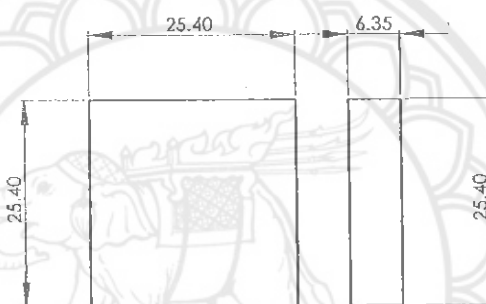
- 3.2.1 เตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบความแข็งและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค
 - 3.2.1.1 เตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบความแข็ง และตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนการนำไปอบและก่อนกระบวนการรีด นำเหล็กแผ่น ST 37 ขนาด ไปได้คให้มีขนาด กว้าง 25.40 มิลลิเมตร ยาว 25.40 มิลลิเมตร หนา 6.35 มิลลิเมตร จำนวน 5 ชิ้น
 - 3.2.1.2 เตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบความแข็ง และตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนการนำไปอบและหลังกระบวนการรีด นำเหล็กแผ่น ST 37 ขนาด กว้าง 50.8 มิลลิเมตร ยาว 1,524 มิลลิเมตร หนา 6.352 มิลลิเมตร นำไปผ่านกระบวนการรีดเย็นให้ได้เปอร์เซ็นต์ Cold Work เท่ากับ 3 เปอร์เซ็นต์ และตัดให้มีขนาด กว้าง 25.40 มิลลิเมตร ยาว 25.40 มิลลิเมตร จำนวน 15 ชิ้น
 - 3.2.1.3 เตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบความแข็ง และตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนการนำไปอบและหลังกระบวนการรีด นำเหล็กแผ่น ST 37 ขนาด กว้าง 50.8 มิลลิเมตร ยาว 1,524 มิลลิเมตร หนา 6.384 มิลลิเมตร นำไปผ่านกระบวนการรีดเย็นให้ได้เปอร์เซ็นต์ Cold Work เท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ และตัดให้มีขนาด กว้าง 25.40 มิลลิเมตร ยาว 25.40 มิลลิเมตร จำนวน 15 ชิ้น
 - 3.2.1.4 เตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบความแข็ง และตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการนำไปอบและหลังกระบวนการรีด นำเหล็กแผ่น ST 37 ขนาด กว้าง 50.8 มิลลิเมตร ยาว 1,524 มิลลิเมตร หนา 6.352 มิลลิเมตร นำไปผ่านกระบวนการรีดเย็นให้ได้เปอร์เซ็นต์

Cold Work เท่ากับ 3 เปอร์เซ็นต์ และตัดให้มีขนาดกว้าง 25.40 มิลลิเมตร ยาว 25.40 มิลลิเมตร จำนวน 15 ชิ้น

3.2.1.5 เตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบความแข็ง และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการนำไปอบและหลังกระบวนการรีด นำเหล็กแผ่น ST 37 ขนาด กว้าง 50.8 มิลลิเมตร ยาว 1,524 มิลลิเมตรหนา 6.384 มิลลิเมตร นำไปผ่านกระบวนการรีดเย็นให้ได้เปอร์เซ็นต์ Cold Work เท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ และตัดให้มีขนาด กว้าง 25.40 มิลลิเมตร ยาว 25.40 มิลลิเมตรจำนวน15ชิ้น

3.2.1.6 ขัดชิ้นงานทดสอบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 320, 500, 800 และ 1,000

3.2.1.7 ขัดมันด้วยจานขัดสั๊กหลอดและผงที่ใช้ขัด คือ อลูมิน่า (Al_2O_3) ขนาด 1 μm



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดสอบความแข็งและ การศึกษาโครงสร้างจุลภาค หน่วยเป็น มิลลิเมตร

3.2.2 เตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึง

3.2.2.1 เตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานก่อนการนำไปอบและก่อนกระบวนการรีด นำเหล็กแผ่น ST 37 ไปกัดให้มีขนาด หนา 6.35 มิลลิเมตร นำมาตัดด้วยเครื่องอัดโนมิตีให้ได้ความยาว 100 มิลลิเมตร ความกว้าง 10 มิลลิเมตร ชิ้นงาน ดังรูป 3.2 จำนวน 5 ชิ้น

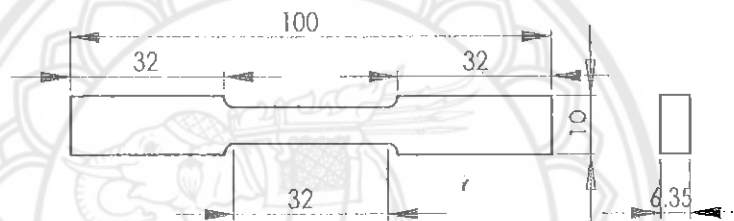
3.2.2.2 เตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานก่อนการนำไปอบ และหลังกระบวนการรีด นำเหล็กแผ่น ST 37 ไปกัดให้มีขนาด หนา 6.352 มิลลิเมตร นำมาตัดด้วยเครื่องอัดโนมิตีให้ได้ความยาว 100 มิลลิเมตร ความกว้าง 10 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานไปทำการรีดเย็นให้ได้ เปอร์เซ็นต์ Cold Work เท่ากับ 3 เปอร์เซ็นต์ ชิ้นงานหลังการรีดดังรูป 3.2 จำนวน 5 ชิ้น

3.2.2.3 เตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานก่อนการนำไปอบและหลังกระบวนการรีด นำเหล็กแผ่น ST 37 ขนาด ไปกัดให้มีขนาด หนา 6.384 มิลลิเมตร นำมาตัดด้วยเครื่องอัดโนมิตีให้ได้ความยาว 100 มิลลิเมตร ความกว้าง 10 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานไปทำการ

รีดเย็นให้ได้ เปรอร์เซ็นต์ Cold Work เท่ากับ 5 เปรอร์เซ็นต์ ชิ้นงานหลังการรีดดังรูป 3.2 จำนวน 5 ชิ้น

3.2.2.4 เตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานหลังการนำไปอบและหลังกระบวนการรีด นำเหล็กแผ่น ST 37 ไปกัดให้มีขนาดหนา 6.352 มิลลิเมตร นำมาตัดด้วยเครื่องอัดโนมิตีให้ได้ความยาว 100 มิลลิเมตร ความกว้าง 10 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานไปทำการรีดเย็นให้ได้ เปรอร์เซ็นต์ Cold Work เท่ากับ 3 เปรอร์เซ็นต์ ชิ้นงานหลังการรีดดังรูป 3.2 จำนวน 5 ชิ้น

3.2.2.5 เตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานหลังการนำไปอบและหลังกระบวนการรีด นำเหล็กแผ่น ST 37 ขนาด ไปกัดให้มีขนาดหนา 6.384 มิลลิเมตร นำมาตัดด้วยเครื่องอัดโนมิตีให้ได้ความยาว 100 มิลลิเมตร ความกว้าง 10 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานไปทำการรีดเย็นให้ เปรอร์เซ็นต์ Cold Work 5 เปรอร์เซ็นต์ชิ้นงานหลังการรีดดังรูป 3.2 จำนวน 5 ชิ้น



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบที่ใช้ทดสอบแรงดึง
ที่มา : อ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM-A370 หน่วย มิลลิเมตร

3.3 การอบปกติ (Normalizing) ชิ้นงานตามอุณหภูมิที่กำหนดไว้ (การกำหนดอุณหภูมิอ้างอิงจากภาคผนวก ก)

3.3.1 การอบปกติที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส

3.3.1.1 ชิ้นงานทดสอบความแข็ง และ โครงสร้างจุลภาค

3.3.1.2 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง

3.3.2 การอบปกติที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

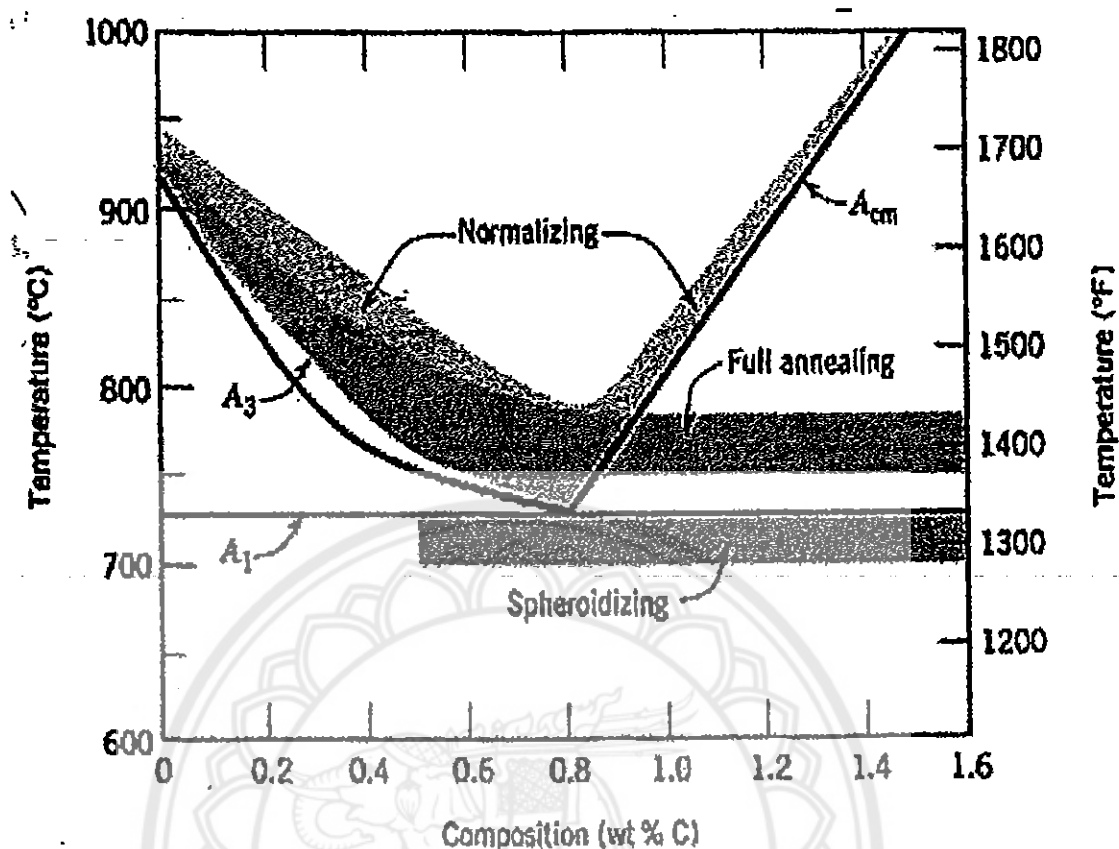
3.3.2.1 ชิ้นงานทดสอบความแข็ง และ โครงสร้างจุลภาค

3.3.2.2 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง

3.3.3 การอบปกติที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส

3.3.3.1 ชิ้นงานทดสอบความแข็ง และ โครงสร้างจุลภาค

3.3.3.2 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3.3 แผนภูมิสมมูลเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์

ที่มา : William D. Callister, Jr. Materials Science and Engineering An Introduction.(หน้า 321)

3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

3.4.1 ทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบความแข็งกับชิ้นงานที่เตรียมไว้ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (HB) มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

3.4.1.1 จัดเตรียมน้ำหนักกด (Load) และหัวกดตามระบบที่ใช้ทดสอบความแข็ง

3.4.1.2 วางชิ้นงานลงบนแท่นรองรับชิ้นงานให้สัมผัสกับหัวกด ให้หัวกดห่างจากขอบชิ้นงานประมาณ 2 มิลลิเมตร

3.4.1.3 ทำการปล่อยน้ำหนักกด (Load) ลงบนชิ้นงานโดยจับเวลา 10 วินาที

3.4.1.4 เมื่อครบ 10 วินาที นำเอาแรงกดที่กดอยู่ออกพร้อมทั้งเคลื่อนชิ้นงานออกจากหัวกดและนำไปวัดรอยกด และนำไปแทนค่าในสูตร เพื่อหาค่าความแข็งของชิ้นงาน

3.4.1.5 การหาค่าความแข็งของชิ้นงานแต่ละชิ้นจะต้องวัดค่าความแข็งอย่างน้อยชิ้นละ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบความแข็งแรงรุ่น ERGOTEST Comp 25
ที่มา : อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนเรศวร

3.4.2 ทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงกับชิ้นงานที่เตรียมไว้ ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงใน รูปที่ 3.5 มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

3.4.2.1 หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานและทำเครื่องหมายไว้

3.4.2.2 ทำเครื่องหมายชิ้นงานต่อจากตำแหน่งหัวจับเป็นระยะทุกๆ 6 mm.จากจุดศูนย์กลางชิ้นงาน

3.4.2.3 เตรียมหัวจับอยู่ในตำแหน่งที่ทำเครื่องหมายไว้ ยึดชิ้นงานทดสอบกับหัวจับให้แน่น พร้อมทั้งติดตั้งเครื่องมือวัดส่วนยึด

3.4.2.4 เดินเครื่องออกแรงดึงจนกระทั่งการยึดตัวถึงจุดคราก ให้นำเครื่องมือวัดส่วนยึดออก จากชิ้นงานตัวอย่าง และเดินเครื่องจนกระทั่งชิ้นงานขาดออกจากกัน

3.4.2.5 นำชิ้นงานที่ขาดออกจากกันมาต่อให้สนิท แล้ววัดระยะยึด โดยวัดระยะความยาวพิคคที่ทำเครื่องหมายไว้พร้อมทั้งวัดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดที่เล็กที่สุดของชิ้นงานตัวอย่าง



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบแรงดึงรุ่น Tx 2106 Model Hook
ที่มา : อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร

3.5 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

ขั้นตอนในการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค มีดังนี้

3.5.1 การเลือก และตัดชิ้นทดสอบ

เป็นการเลือกชิ้นงานทดสอบที่เหมาะสม และตัดเตรียมตามจำนวนที่ต้องการ แต่ถ้าชิ้นงานทดสอบมีขนาดเล็กมากก็ควรหุ้มชิ้นงานทดสอบด้วยเรซิน โดยที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบอยู่ภายนอกของเรซิน และขนาดของเรซินควรมีความใกล้เคียงกับชิ้นทดสอบ

3.5.2 การขัดผิวชิ้นงานทดสอบ

ควรขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 180, 320, 500, 800, 1,000 ตามลำดับ ควรขัดด้วยการวางกระดาษทรายบนกระดาษเรียบขัดด้วยมือหรือใช้เครื่องขัด แบบจานหมุนแล้วจับชิ้นงานทดสอบด้วยมือ หรือขัดอัตโนมัติ ในขณะที่ขัดนั้นจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้น้ำชำระสิ่งสกปรก ซึ่งได้แก่ ผงโลหะ และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไปควรขัดชิ้นงานทดสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิม ทำเช่นนี้ถึงกระดาษแผ่นสุดท้ายการขัดผิวชิ้นงานทดสอบควรใช้แรงพอประมาณ ไม่ควรออกแรงมากเกินไป ทั้งนี้ จะส่งผลให้โครงสร้างของชิ้นงานทดสอบเกิดความบอบพร่อง จนทำให้เกิดการตรวจสอบโครงสร้างเกิดการผิดพลาดได้

3.5.3 การขัดด้วยผงขัด (Polishing)

การขัดผิวในขั้นตอนนี้เป็นการขัดผิวมันของชิ้นงานทดสอบด้วยผงขัดที่ทำจากผงอลูมินา (Alumina Oxide) การขัดด้วยผงขัดนี้จะต้องขัดบนจานหมุนที่ห่อหุ้มด้วยผ้าสักหลาด โดยขัดผงขัดผสมกับน้ำเทลงบนสักหลาด แล้วขัดผิวจนเป็นมัน

3.5.4 การกัดกรด

ชิ้นงานทดสอบที่ถูกขัดจนเป็นมันแล้วนั้นจะต้องล้างด้วยแอลกอฮอล์ จากนั้นนำไปกัดด้วยกรด HNO_3 ความเข้มข้น 3 % ในสารละลายเป็นเวลาประมาณ 10-20 วินาที

3.5.5 การล้างในเอทานอล

นำชิ้นงานที่ผ่านการกัดกรดมาล้างในเอทานอล แล้วนำไปเป่าลมให้แห้ง

3.5.6 การดูโครงสร้าง

นำชิ้นงานทดสอบไปตรวจดูโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ใช้กำลังขยาย 500 ไมครอน

3.6 การรีดเย็น

3.6.1 ขั้นตอนการรีดเย็น

3.6.1.1 นำชิ้นงานใส่เครื่องรีด

3.6.1.2 ปรับขนาดของลูกรีดทั้งสองให้กดทับชิ้นงาน

3.6.1.3 ใช้มือหมุนจนชิ้นงานผ่านลูกรีดจนหมด

3.6.1.4 ใช้เวอร์เนียวัดขนาดของชิ้นงาน

3.6.1.5 ทำซ้ำข้อ 3.6.1.1 ถึง 3.6.1.4 จนกว่าจะได้ขนาดชิ้นงานตามเปอร์เซ็นต์การรีดที่

ต้องการ

3.6.2 เครื่องรีดที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องรีด TA-MINE Model SR-5016 Maximum 50"×16 GA

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์

ผลการทดสอบสมบัติของเหล็ก ST 37 คือ การทดสอบค่าความแข็ง ความทนต่อแรงดึง โมดูลัสของความยืดหยุ่น เปรอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น และการเปรียบเทียบ โครงสร้างทางจุลภาค

จากการนำชิ้นงาน คือ เหล็ก ST 37 จำนวนทั้งหมด 90 ชิ้น แบ่งเป็นใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลจำนวน 45 ชิ้น และใช้ในการเปรียบเทียบโครงสร้าง 45 ชิ้นมาทำการทดลองตาม เปรอร์เซ็นต์การรีดเย็น และอุณหภูมิต่าง ๆ ดังนี้

1. เปรอร์เซ็นต์การรีดเย็น คือ 3 เปรอร์เซ็นต์ และ 5 เปรอร์เซ็นต์
 2. อุณหภูมิที่ใช้ในการอบปกติ คือ 850°C , 950°C และ $1,000^{\circ}\text{C}$
- ทำให้ได้สมบัติเชิงกลดังนี้

4.1 การทดสอบความแข็ง

4.1.1 จุดประสงค์

4.1.1.1 เพื่อให้ทราบและทำการวิเคราะห์ค่าความแข็งของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป

4.1.1.2 เพื่อให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของชิ้นงาน กับ เปรอร์เซ็นต์การรีดเย็นและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบปกติ

4.1.2 อุปกรณ์

4.1.2.1 เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (HB)พร้อมติดตั้งหัวกดทดสอบความแข็งเข้ากับเครื่องทดสอบที่ผ่านการตรวจสอบมาตรฐานตามระบบทดสอบที่ต้องการแล้ว

4.1.2.2 ชิ้นงานทดสอบ

4.1.2.3 ฐานรองชิ้นงานตามลักษณะของชิ้นงาน

4.1.3 วิธีการทดสอบ

4.1.3.1 เตรียมชิ้นงาน

ก. จัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ต่ำที่สุดจนผ่านกระดาษทรายเบอร์ 800

ข. ตรวจสอบว่าผิวชิ้นงานด้านที่มีขีดกระดาษทรายต้องเรียบไม่มีปุ่มนูนและผิวขนานกับผิวงานด้านที่ขีดกระดาษทราย

ค. ตรวจสอบว่าผิวชิ้นงานสะอาดปราศจากเศษผง โลหะและคราบสกปรก

4.1.3.2 ทำความสะอาดผิวของฐานรองชิ้นงานที่เครื่องทดสอบความแข็ง

4.1.3.3 วางชิ้นงานทดสอบลงบนฐานรองชิ้นงานที่เครื่องทดสอบความแข็ง โดยให้ด้านที่ขัดกระดาษทรายหงายอยู่ด้านบน ตรวจสอบว่าผิวชิ้นงานด้านสัมผัสกับฐานรองชิ้นงานแนบสนิทดี หากไม่แนบสนิทค่าความแข็งที่ได้จะผิดพลาด

4.1.3.4 ตรวจสอบว่าหัวกดทดสอบความแข็ง โผล่พ้นการ์ดป้องกันหัวทดสอบ

4.1.3.5 เลือกตำแหน่งการทดสอบ ไม่ควรทดสอบบริเวณริมขอบชิ้นงานมากเกินไป เพราะอาจทำให้ชิ้นงานล้าได้

4.1.3.6 ทำการทดสอบความแข็งตามวิธีการใช้เครื่องทดสอบความแข็ง ตามระบบบริเนล

ก. หมุนฐานรองชิ้นงานขึ้นช้าๆ จนกระทั่งชิ้นงานทดสอบสัมผัสกับหัวทดสอบ

ข. สังเกตที่เห็นสันบนหน้าปัด ค่อยๆ หมุนฐานรองขึ้นอีกช้าๆ จนกว่าเข็มสันบนหน้าปัดจะอยู่กลางวงกลมสีแดง (หากเลขจุดสีแดงถือว่าจุดทดสอบนี้เสียต้องเปลี่ยนจุดใหม่) หมุนหน้าปัดให้เข็มยาวชี้ที่ศูนย์

ค. ดันคันบังคับไปทางด้านหลังเบาๆ

ง. รอจนเข็มบนหน้าปัดหยุดนิ่ง จึงเริ่มจับเวลาทดสอบความแข็งตามที่กำหนด

จ. เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้ว ดึงคันบังคับกลับมาสู่ตำแหน่งเดิม

4.1.3.7 บันทึกค่าที่ได้จากการทดลอง โดยอ่านค่าที่หน้าปัดของเครื่องทดสอบความแข็ง

4.1.3.8 หมุนฐานรองลงและเอาชิ้นงานออก

4.1.3.9 ทดสอบความแข็งชิ้นงานชิ้นละ 3 ค่า โดยการทดสอบแต่ละครั้งรอยกดจะต้องห่างจากรอยเดิมไม่น้อยกว่า 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด

4.1.3.10 นำค่าที่ได้จากการทดสอบความแข็งชิ้นงานทั้ง 3 ค่า หาค่าความแข็งของชิ้นงานโดยเฉลี่ย

4.1.4 ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานก่อนกระบวนการรีดและก่อนกระบวนการอบ

ชิ้นงานที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	173.0	182.0	176.0	177.0
2	152.0	179.0	159.0	163.3
3	152.0	170.0	159.0	160.3
4	154.0	162.0	162.0	159.3
5	157.0	162.0	157.0	158.6
ค่าเฉลี่ย	157.6	171.0	162.6.0	163.7

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานก่อนกระบวนการอบและหลังกระบวนการรีดที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น ที่ 3 %

ชิ้นงานที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	154.0	167.0	189.0	170.0
2	176.0	189.0	182.0	182.3
3	154.0	164.0	173.0	163.7
4	167.0	182.0	186.0	178.3
5	170.0	176.0	193.0	179.6
ค่าเฉลี่ย	164.2	175.6	184.6	174.8

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานก่อนกระบวนการอบและหลังกระบวนการรีดที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น ที่ 5 %

ชิ้นงานที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	178.8	163.6	185.2	175.8
2	208.6	154.8	224.7	196.0
3	185.2	176.8	176.8	179.6
4	165.3	185.2	194.1	181.5
5	189.3	193.8	189.3	190.8
ค่าเฉลี่ย	185.4	174.8	194.0	184.7

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหลังกระบวนการอบที่อุณหภูมิ 850 °c และหลังกระบวนการรีดที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น ที่ 3 %

ชิ้นงานที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	144.0	136.0	152.0	144.0
2	144.0	150.0	148.0	147.3
3	144.0	148.0	150.0	147.3
4	148.0	150.0	148.0	148.6
5	154.0	150.0	152.0	152.0
ค่าเฉลี่ย	146.8	146.8	150.0	147.8

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหลังกระบวนการอบที่อุณหภูมิ 900 °c และหลังกระบวนการรีดที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น ที่ 3 %

ชิ้นงานที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	140.0	152.0	159.0	150.3
2	148.0	152.0	150.0	150.0
3	136.0	134.0	134.0	134.6
4	152.0	136.0	138.0	142.0
5	140.0	142.0	138.0	140.0
ค่าเฉลี่ย	143.2	143.2	143.8	143.4

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหลังกระบวนการอบที่อุณหภูมิ 1000 °c และหลังกระบวนการรีดที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น ที่ 3 %

ชิ้นงานที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	148.0	136.0	134.0	139.3
2	154.0	162.0	148.0	154.6
3	140.0	140.0	136.0	138.6
4	138.0	142.0	138.0	139.3
5	136.0	140.0	144.0	140.0
ค่าเฉลี่ย	143.2	144.0	140.0	142.4

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหลังกระบวนการอบที่อุณหภูมิ 850 °c และหลังกระบวนการรีดที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น ที่ 5 %

ชิ้นงานที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	140.0	140.0	150.0	143.3
2	150.0	154.0	148.0	150.6
3	154.0	157.0	159.0	156.6
4	157.0	159.0	164.0	160.0
5	154.0	167.0	160.0	160.3
ค่าเฉลี่ย	151.0	155.4	156.2	154.2

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหลังกระบวนการอบที่อุณหภูมิ 900 °c และหลังกระบวนการรีดที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น ที่ 5 %

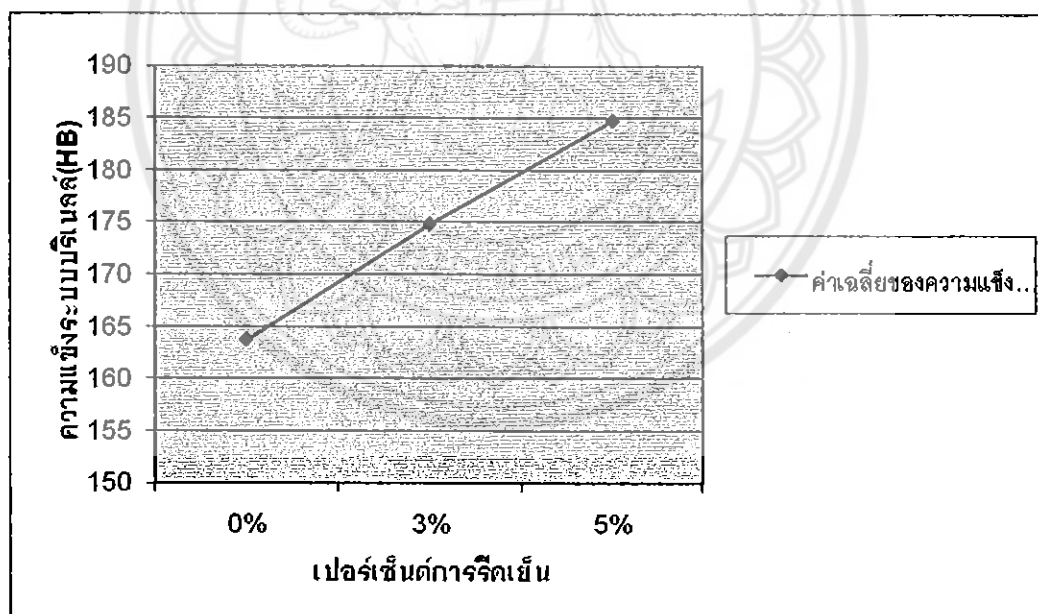
ชิ้นงานที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	142.0	157.0	164.0	154.3
2	146.0	159.0	164.0	156.3
3	144.0	154.0	154.0	150.6
4	146.0	157.0	154.0	152.3
5	146.0	154.0	157.0	152.3
ค่าเฉลี่ย	144.8	156.2	158.6	153.2

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหลังกระบวนการอบที่อุณหภูมิ 1000 °c และหลังกระบวนการรีดที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น ที่ 5 %

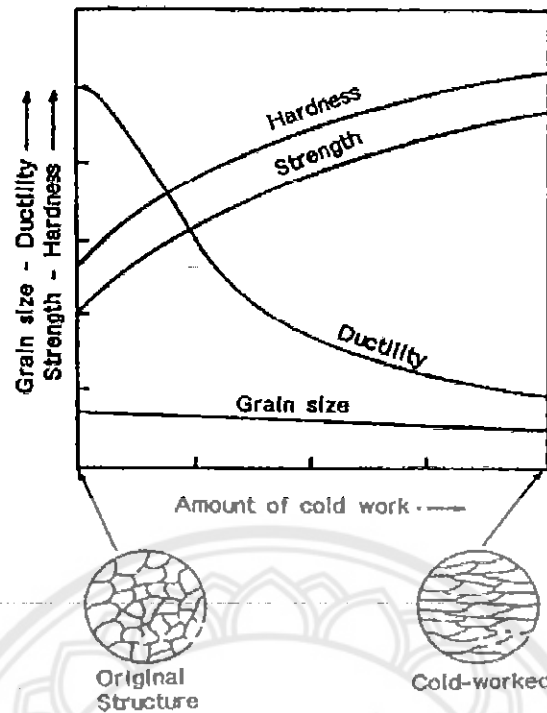
ชิ้นงานที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	134.0	142.0	146.0	140.6
2	140.0	150.0	152.0	147.3
3	136.0	140.0	144.0	140.0
4	138.0	142.0	142.0	140.6
5	136.0	134.0	142.0	137.3
ค่าเฉลี่ย	136.8	141.6	145.2	141.2

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าความของความแข็งแบบบริเนลล์ (HB)

ชิ้นงาน ที่	ชิ้นงาน ก่อน การรีด และ การอบ	ชิ้นงานหลังการรีด และ ก่อนการนำไปอบ		ชิ้นงานหลังการรีดและหลังการนำไปอบ					
		เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็น ที่ 3%	เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็น ที่ 5%	เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็นที่ 3%			เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็นที่ 5%		
				อุณหภูมิ 850°C	อุณหภูมิ 900°C	อุณหภูมิ 1000°C	อุณหภูมิ 850°C	อุณหภูมิ 900°C	อุณหภูมิ 1000°C
1	177.0	170.0	175.8	144.0	150.3	139.3	143.3	154.3	140.6
2	163.3	182.3	196	147.3	150.0	154.6	150.6	156.3	147.3
3	160.3	163.7	179.6	147.3	134.6	138.6	156.6	150.6	140.0
4	159.3	178.3	181.5	148.6	142.0	139.3	160.0	152.3	140.6
5	158.6	179.6	190.8	152.0	140.0	140.0	160.3	152.3	137.3
เฉลี่ย	163.7	174.8	184.7	147.8	143.4	142.2	154.2	153.1	141.1



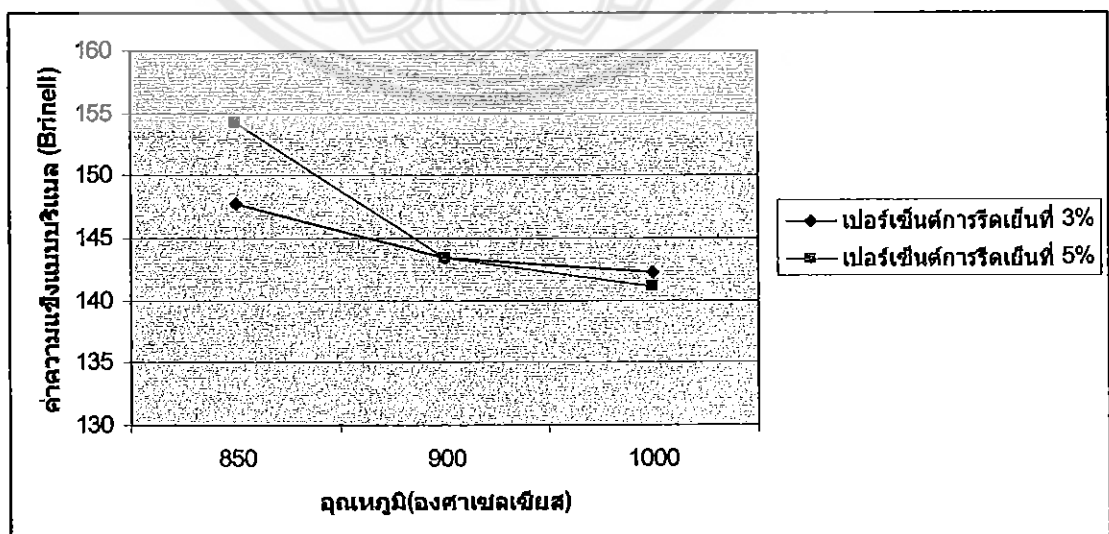
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการทดสอบความแข็งหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นต่างๆ



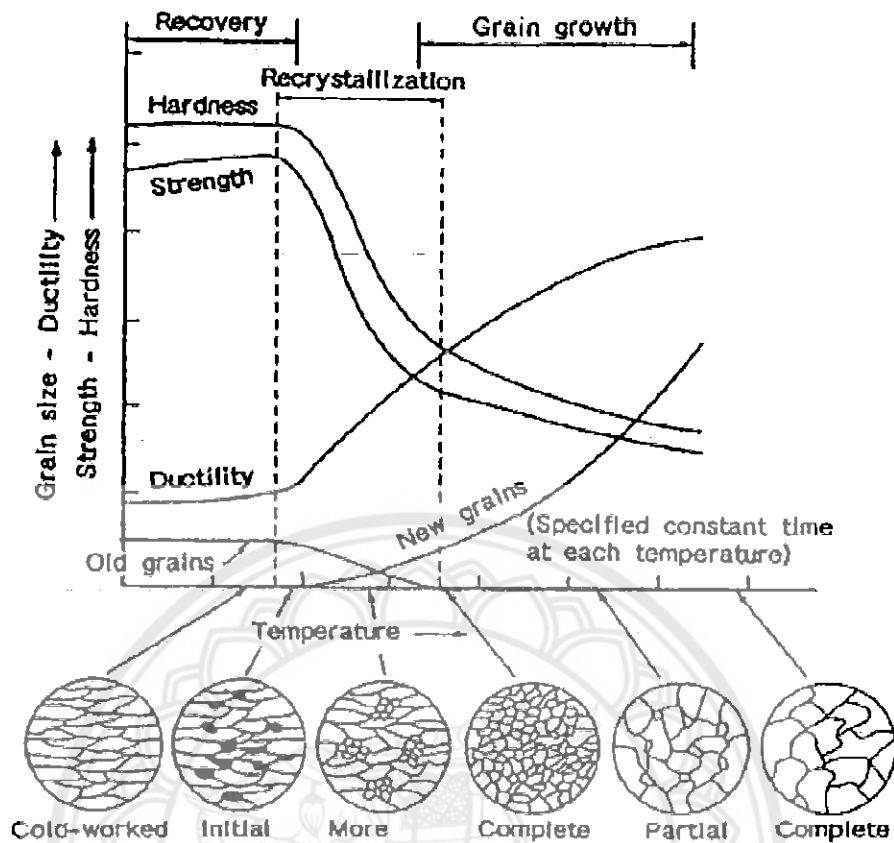
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการทดสอบความแข็งหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นต่างๆ ตามทฤษฎี

ที่มา: Vladimir B. Ginzburg, Flat Rolling Fundamentals, pp.348

จากกราฟ รูปที่ 4.1 เมื่อเทียบกับกราฟรูปที่ 4.2 จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกันและจะเห็นได้ว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์การรีดเย็นสูงขึ้นค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้น เพราะว่าเหล็กที่ผ่านการการรีดเย็นจะมีความเครียดเกิดขึ้นภายในโครงสร้าง ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการทดสอบความแข็งที่อุณหภูมิการอบปกติต่างๆ



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการทดสอบความแข็งที่อุณหภูมิการอบอ่อนต่างๆ จากทฤษฎี

ที่มา: Vladimir B. Ginzburg, Flat Rolling Fundamentals, pp.349

จากกราฟ รูปที่ 4.3 เมื่อเทียบกับกราฟรูปที่ 4.4 จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกันและจะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิอบปกติสูงขึ้นค่าความแข็งจะลดลง เพราะว่าเหล็กที่ผ่านการอบปกติจะมีการจัดเรียงเกรนใหม่ ซึ่งจะส่งผลให้โครงสร้างและสมบัติเชิงกลของเหล็กเปลี่ยนแปลงไปด้วย เมื่อขนาดเกรนเปลี่ยนแปลงไปจึงทำให้ค่าความแข็งเปลี่ยนไปเช่นกัน

4.2 การทดสอบแรงดึง

4.2.1 จุดประสงค์

4.2.1.1 เพื่อทราบหลักการทำงานและวิธีการทดสอบแรงดึงของโลหะ

4.2.1.2 เพื่อศึกษาความสามารถทนแรงดึงของโลหะก่อนการรีด ก่อนการอบ หลังการรีด

ก่อนการอบ และหลังการรีด หลังการอบ

4.2.2 อุปกรณ์

4.2.2.1 ชิ้นงานทดลอง

4.2.2.2 เครื่องทดสอบแรงดึง

4.2.2.3 เครื่องปริ้นท์ และกระดาษ A 4

4.2.3 วิธีการทดสอบ

4.2.3.1 เปิดเครื่องทดสอบแรงดึง ทำการเซตค่าในการทดสอบ โดยจะทำการทดสอบตัวอย่างละ 5 ชิ้นทดสอบ

4.2.3.2 เตรียมหัวจับยึดชิ้นงานให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม จับยึดปลายชิ้นงานทดสอบกลับหัวจับให้แน่นทั้งสองด้าน

4.2.3.3 เดินเครื่องเพื่อเริ่มทำการทดสอบการดึงชิ้นงาน เดินเครื่องจนกว่าชิ้นงานจะขาดออกจากกัน

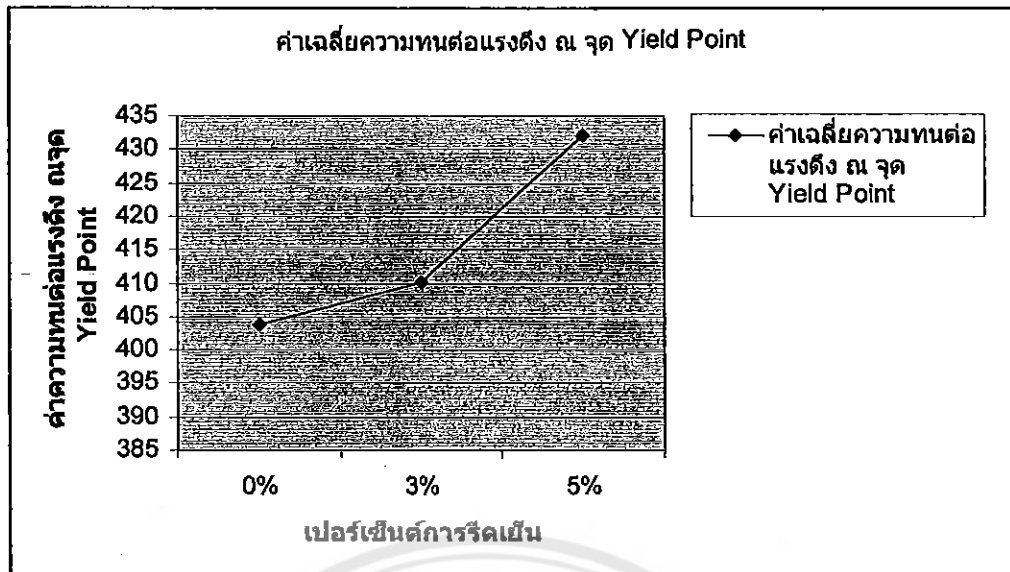
4.2.3.4 เมื่อชิ้นงานขาดออกจากกัน เครื่องจะทำการแสดงค่า แรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงาน ระยะเวลายืดออกของชิ้นงาน ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้น เมื่อทำการทดสอบครบทั้ง 5 ตัวอย่าง เครื่องจะทำการพอดกราฟ เส้นโค้งความเค้น ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)

4.2.4 ผลการทดสอบ

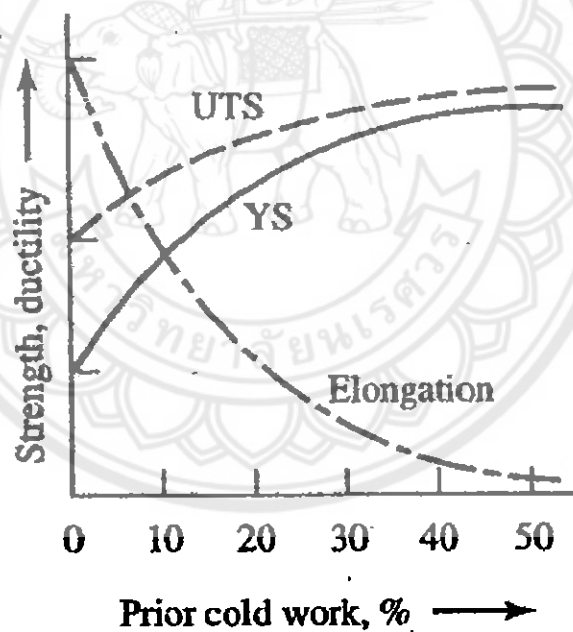
4.2.4.1 ค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile strength)

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุด Yield Point ของเหล็ก ST 37 (หน่วย:Mpa)

ชิ้นงาน ที่	ชิ้นงาน ก่อน การรีด และ ก่อน การอบ	ชิ้นงานหลังการรีด และ ก่อนการนำไปอบ		ชิ้นงานหลังการรีดและหลังการนำไปอบ					
		เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็น ที่ 3%	เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็น ที่ 5%	เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็นที่ 3%			เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็นที่ 5%		
				อุณหภูมิ 850 °c	อุณหภูมิ 900 °c	อุณหภูมิ 1000 °c	อุณหภูมิ 850 °c	อุณหภูมิ 900 °c	อุณหภูมิ 1000 °c
1	377.95	408.19	430.66	390.55	377.95	371.65	384.25	390.55	365.37
2	403.15	411.96	434.54	384.26	366.61	384.26	377.96	384.27	377.95
3	413.23	405.03	428.34	365.35	384.26	357.79	384.26	352.77	365.37
4	385.51	410.07	430.86	371.67	365.36	377.96	390.55	352.75	352.75
5	438.43	415.12	435.70	384.25	377.96	359.07	390.55	396.85	396.85
ค่าเฉลี่ย	403.65	410.07	432.02	379.21	374.43	370.15	385.51	375.44	371.66



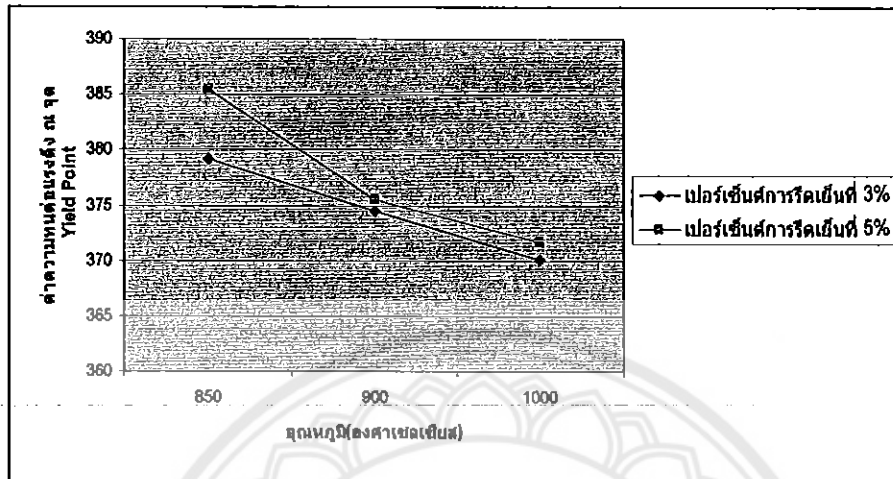
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการทดสอบความทนต่อแรงดึงหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นต่างๆ



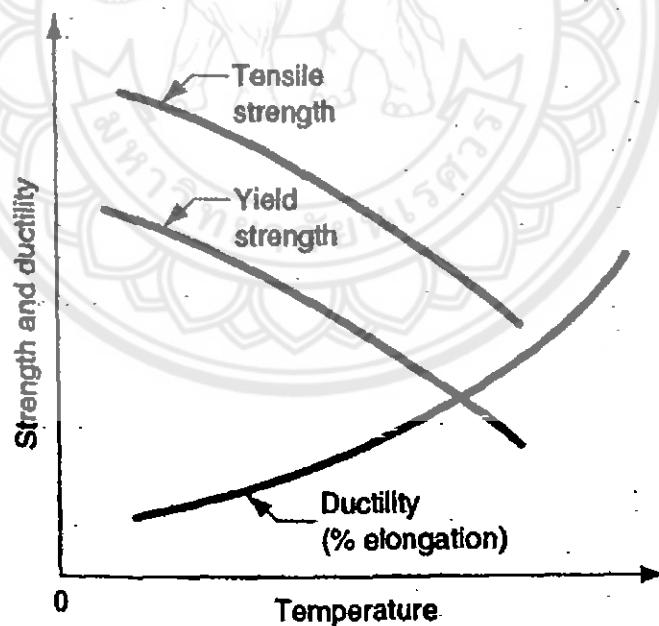
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การรีดเย็นที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นต่างๆจากทฤษฎี

ที่มา: John A. Schey. Introduction to Manufacturing Processes Third Edition . (pp. 264)

จากกราฟ รูปที่ 4.5 เมื่อเทียบกับกราฟรูปที่ 4.6 จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกันและจะเห็นได้ว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์การรีดเย็นสูงขึ้นค่าความทนต่อแรงดึง จะเพิ่มขึ้น เพราะว่าเหล็กที่ผ่านการการรีดเย็น จะมีความเครียดเกิดขึ้นภายใน โครงสร้าง ทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.7 กราฟการทดสอบการทนต่อแรงดึงที่อุณหภูมิการอบปกติต่าง ๆ



รูปที่ 4.8 อุณหภูมิในการอบปกติที่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น

ที่มา: Mikell P. Groover. Fundamentals of Modern Manufacturing. (pp. 56)

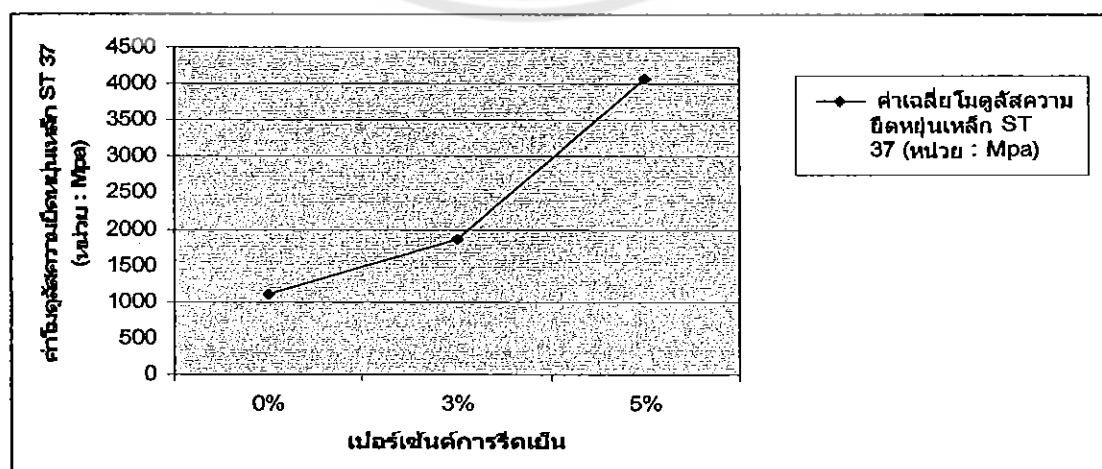
จากกราฟ รูปที่ 4.7 เมื่อเทียบกับกราฟรูปที่ 4.8 จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกันและจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิอบปกติสูงขึ้นค่าความทนต่อแรงดึงจะลดลง เพราะว่าเหล็กที่ผ่านการอบปกติจะมีการ

จากกราฟ รูปที่ 4.7 เมื่อเทียบกับกราฟรูปที่ 4.8 จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกันและจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิอบปกติสูงขึ้นค่าความทนต่อแรงดึงจะลดลง เพราะว่าเหล็กที่ผ่านการอบปกติจะมีการจัดเรียงเกรนใหม่ ซึ่งจะส่งผลให้โครงสร้างและสมบัติเชิงกลของเหล็กเปลี่ยนแปลงไปด้วย เมื่อขนาดเกรนเปลี่ยนแปลงไปจึงทำให้ความทนต่อแรงดึงเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน

4.2.4.2 โมดูลัสความยืดหยุ่น

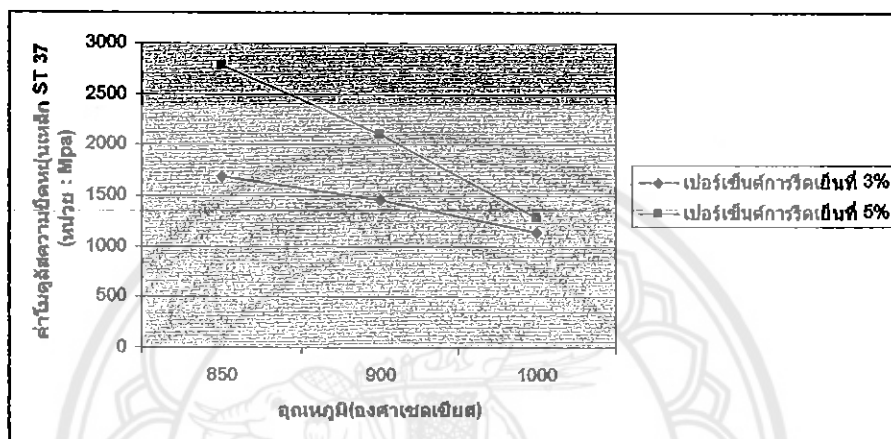
ตารางที่ 4.12 แสดงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเหล็ก ST 37 (หน่วย : Mpa)

ชิ้นงาน ที่	ชิ้นงาน ก่อน การรีด และ ก่อน การอบ	ชิ้นงานหลังการรีด และ ก่อนการนำไปอบ		ชิ้นงานหลังการรีดและหลังการนำไปอบ					
		เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็น ที่ 3%	เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็น ที่ 5%	เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็นที่ 3%			เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็นที่ 5%		
				อุณหภูมิ 850 °c	อุณหภูมิ 900 °c	อุณหภูมิ 1000 °c	อุณหภูมิ 850 °c	อุณหภูมิ 900 °c	อุณหภูมิ 1000 °c
1	1323.82	1686.73	3090.11	2566.03	1204.43	930.52	3091.32	2251.06	1358.76
2	1308.50	1655.82	4749.12	3129.15	1658.13	1280.46	2992.63	1928.14	952.982
3	1090.60	3420.94	2571.10	917.74	4158.66	1532.31	3076.54	2408.00	1423.89
4	1077.75	1896.75	6068.53	1784.30	1223.58	1090.48	3349.56	1027.54	1310.38
5	875.79	1467.36	2572.04	1581.28	1046.13	1020.09	1952.75	1907.93	1556.27
ค่าเฉลี่ย	1102.39	1850.03	4064.97	1686.31	1454.44	1134.31	2785.13	2099.78	1284.86

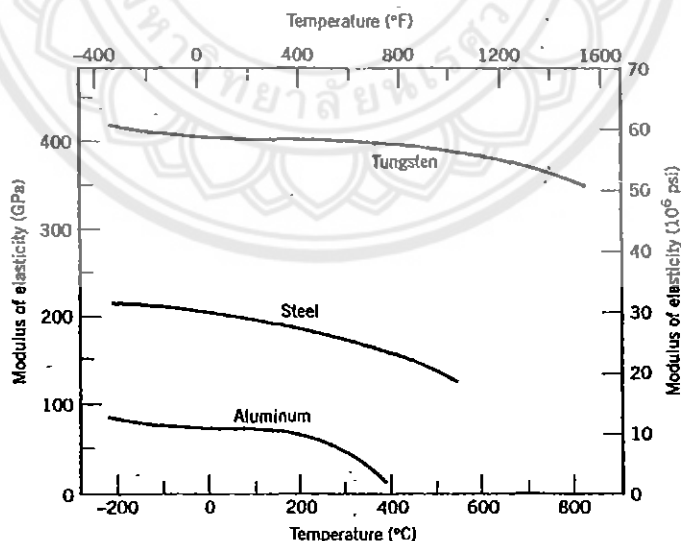


รูปที่ 4.9 กราฟโมดูลัสความยืดหยุ่นที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น ต่าง ๆ

จากทฤษฎีโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับความทนต่อแรงดึงหารกับระยะยืด จากการทดลอง จะเห็นได้ว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์การรีดเย็นสูงขึ้นค่าความทนต่อแรงดึง จะเพิ่มขึ้นและเมื่อเปอร์เซ็นต์การรีดเย็นสูงขึ้นค่าของเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นจะลดลง เมื่อแทนค่าในสมการจะทำให้ได้ว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์การรีดเย็นสูงขึ้น โมดูลัสความยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้น เพราะว่าเหล็กที่ผ่านการรีดเย็นจะมีความเครียดเกิดขึ้นภายในโครงสร้าง ทำให้ความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น ความยืดหยุ่นจะลดลง ส่งผลให้โมดูลัสความยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.10 กราฟ โมดูลัสความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิการอบปกติ ต่าง ๆ



รูปที่ 4.11 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับค่าโมดูลัสของยัง ของเหล็ก อลูมิเนียม

และทั้งสแตน

ที่มา: William D Callister, JR. Matreal Science and Engineering An Introduttiob . (pp. 115)

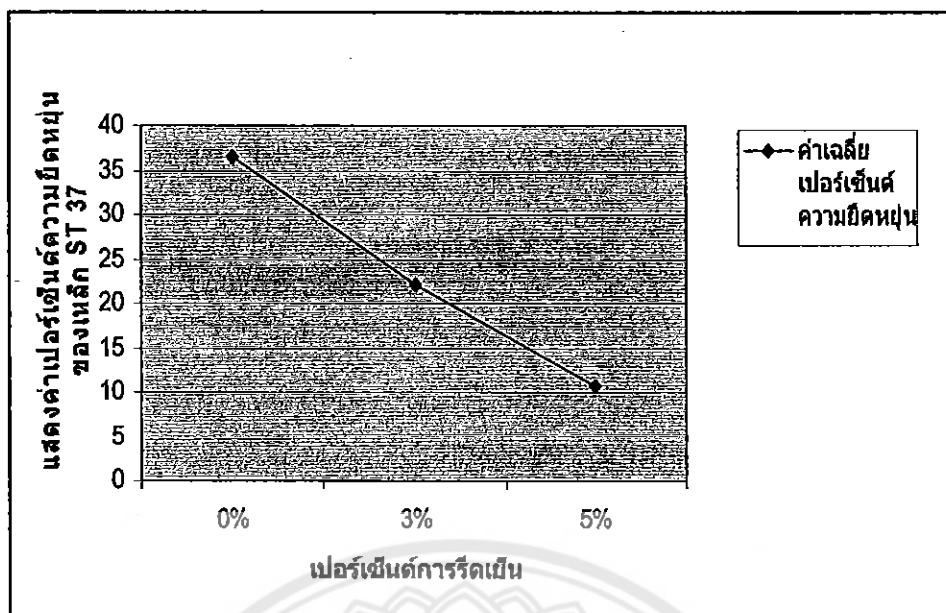
ปกติจะมีการจัดเรียงเกรนใหม่ ซึ่งจะส่งผลให้โครงสร้างและสมบัติเชิงกลของเหล็กเปลี่ยนแปลงไป ด้วย เมื่อขนาดเกรนเปลี่ยนแปลงไปจึงทำให้โมดูลัสความยืดหยุ่นเปลี่ยนไปเช่นกัน

4.2.4.3 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น (% Elongation)

$$\text{จากสมการ \% Elongation} = \left[\frac{L_f - L_0}{L_0} \right] \times 100 \% \quad (4.1)$$

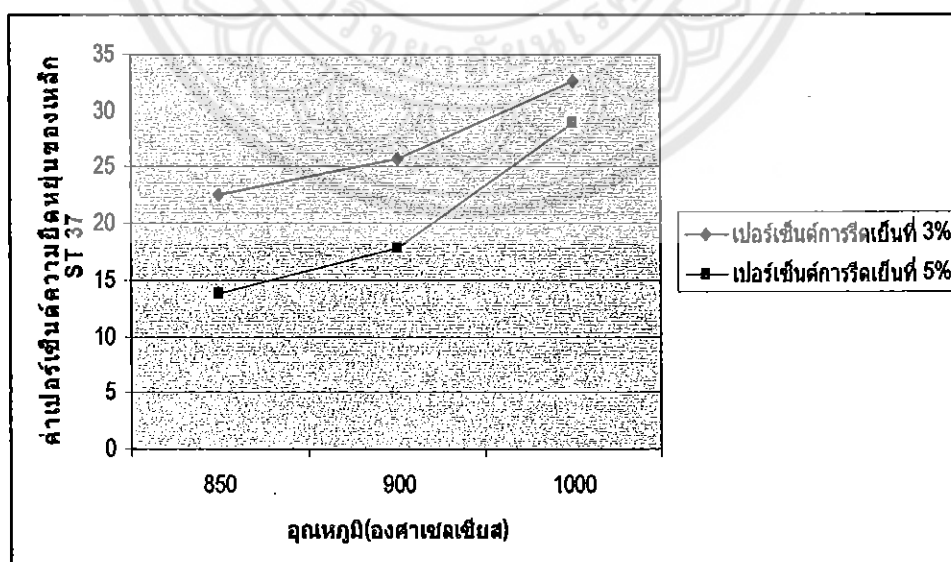
ตารางที่ 4.13 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของเหล็ก ST 37 (หน่วย:เปอร์เซ็นต์)

ชิ้นงาน ที่	ชิ้นงาน ก่อน การรีด และ ก่อน การอบ	ชิ้นงานหลังการรีด และ ก่อนการนำไปอบ		ชิ้นงานหลังการรีดและหลังการนำไปอบ					
		เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็น ที่ 3%	เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็น ที่ 5%	เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็นที่ 3%			เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็นที่ 5%		
				อุณหภูมิ 850 °c	อุณหภูมิ 900 °c	อุณหภูมิ 1000 °c	อุณหภูมิ 850 °c	อุณหภูมิ 900 °c	อุณหภูมิ 1000 °c
		1	28.55	24.20	3.29	15.22	31.38	39.94	12.43	17.35	26.89
2	30.81	24.88	9.15	12.28	22.11	30.01	12.63	2.27	39.66
3	37.89	11.84	16.66	39.81	9.24	23.35	12.49	14.65	25.66
4	35.77	21.62	7.10	20.83	29.86	34.66	11.66	34.33	26.92
5	50.06	28.29	16.94	24.30	36.13	35.20	20.00	20.80	25.50
ค่าเฉลี่ย	36.62	22.16	10.62	22.48	25.74	32.63	13.84	17.88	28.92

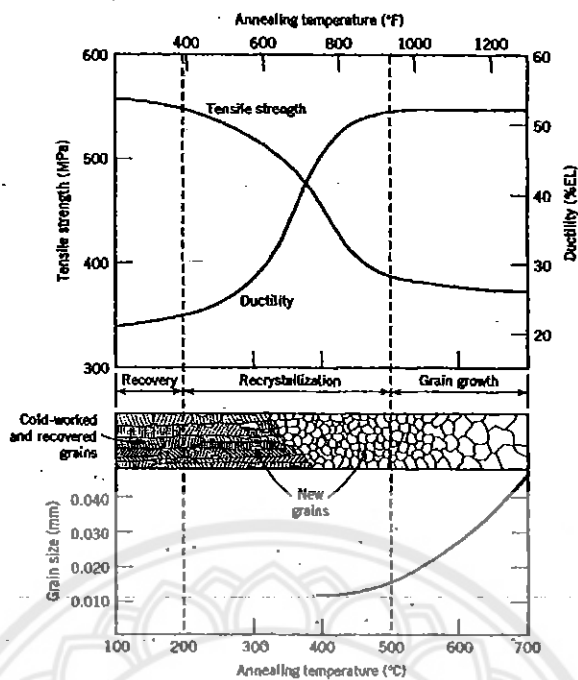


รูปที่ 4.12 กราฟเปอร์เซ็นต์ความยึดหยุ่นที่เปอร์เซ็นต์การริดยื่นต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.12 เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟรูปที่ 4.2 จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน และจะเห็นได้ว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์การริดยื่นสูงขึ้นค่าของเปอร์เซ็นต์ความยึดหยุ่นจะลดลง เพราะว่าเหล็กที่ผ่านการอบปกติจะมีการจัดเรียงเกรนใหม่ ซึ่งจะส่งผลให้โครงสร้างและสมบัติเชิงกลของเหล็กเปลี่ยนแปลงไปด้วย เมื่อขนาดเกรนเปลี่ยนแปลงไปจึงทำให้เปอร์เซ็นต์ความยึดหยุ่นเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน



รูปที่ 4.13 กราฟเปอร์เซ็นต์ความยึดหยุ่นที่อุณหภูมิอบปกติ ต่าง ๆ



รูปที่ 4.14 อุณหภูมิของการอบอ่อนที่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึง เเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น และขนาดของเกรน

ที่มา: William D Callister, JR. Material Science and Engineering An Introduction . (pp. 169)

จากรูปที่ 4.13 เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟรูปที่ 4.14 จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน และจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าของเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้น เพราะว่าเหล็กที่ผ่านการอบปกติจะมีการจัดเรียงเกรนใหม่ ซึ่งจะส่งผลให้โครงสร้างและสมบัติเชิงกลของเหล็กเปลี่ยนแปลงไปด้วย เมื่อขนาดเกรนเปลี่ยนแปลงไปจึงทำให้เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นเปลี่ยนไปเช่นกัน

4.3 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค

โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะ สามารถดูได้จากการจัดเรียงตัวของอะตอมของโลหะนั้น การจัดเรียงตัวของอะตอมของโลหะจะถูกแบ่งแยกด้วยขอบเกรน และในแต่ละเกรนจะสามารถบอกได้ถึง ความแข็งแรงของโลหะเพราะถ้าเกรนมีขนาดเล็กก็จะแสดงว่าโลหะนั้นมีความแข็งแรง เพราะถ้าเกรนมีขนาดเล็ก จะทำให้ตัว Dislocation ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้มากและยังทำให้ตัว Dislocation ไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามขอบเกรนแต่ละเกรนได้ การเคลื่อนที่ของตัว Dislocation ถ้ามีการเคลื่อนที่น้อยที่สุดจะทำให้โลหะมีความแข็งแรงสูงขึ้นด้วย

4.3.1 วัตถุประสงค์

4.3.1.1 เพื่อศึกษาถึงหลักการและวิธีการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะ

4.3.1.2 เพื่อศึกษาขนาด รูปร่างและการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกของเหล็กทั้งก่อนและหลังจากผ่านกระบวนการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์ ต่างๆ และผ่านการอบปกติ

4.3.2 อุปกรณ์

- 4.3.2.1 ชิ้นงานทดสอบ
- 4.3.2.2 กระจกทรายเบอร์ 180 , 320 ,500 , 800 , 1000
- 4.3.2.3 น้ำยาผงอลูมิน่า
- 4.3.2.4 เครื่องขัดชิ้นงาน
- 4.3.2.5 กรด Hcl และ Ethanol ใส่ในขามรูปไต
- 4.3.2.6 กล้องทางโลหะวิทยา
- 4.3.2.7 ทีวี, กระจกพิมพ์รูปโครงสร้าง, กระจกทึบ

4.3.3 วิธีการทดลอง

4.3.3.1 การเตรียมชิ้นงาน ขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 หลังจากนั้นเปลี่ยนเป็น320,500,800 และ1,000 ตามลำดับ

4.3.3.2 ตรวจสอบชิ้นงานว่ารอยขัดเรียบสม่ำเสมอทั้งก่อน ไม่มีรอยขีดคัดขวาง

4.3.3.3 การกัดกรด ขั้นตอนนี้มีอุปกรณ์คือ ขามรูปไต 3 ใบ มีรายละเอียดดังนี้

ก. ขามรูปไตขามแรกซ้ายมือสุดใส่แอลกอฮอล์ สำหรับล้างชิ้นงานก่อนกัดกรด
 ข. ขามรูปไตขามที่สอง ตรงกลาง ใส่แอลกอฮอล์ผสมกรด เพื่อใช้กัดกรด
 ค. ขามรูปไตขามที่สาม (ใหญ่ที่สุด) ขวามือสุด ใส่แอลกอฮอล์สำหรับล้างชิ้นงานหลังการกัดกรด

4.3.3.4 นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดมันแล้ว ทำความสะอาดให้ปราศจากคราบไขมันและแห้ง ดำเนินการกัดกรด

ก. ล้างชิ้นงานที่ขัดมันแล้วด้วยแอลกอฮอล์ โดยจุ่มชิ้นงานด้านที่ต้องการกัดกรดลงในแอลกอฮอล์ (ขามรูปไตขามแรก ซ้ายมือสุด) กำหนดให้หันด้านที่ขัดมันแล้วลงด้านล่างและแกว่งชิ้นงานในแอลกอฮอล์เบาๆ

ข. ถือชิ้นงานที่ล้างแอลกอฮอล์แล้วในอากาศจนหมาด ห้ามเป่าอาจทำให้ชิ้นงานจะขึ้นได้

ค. นำผิวชิ้นงานที่หมาดแล้วจุ่มลงในน้ำยากัดกรด (ขามรูปไตขามกลาง) ใช้เวลาประมาณ 10-20 วินาที โดยจุ่มชิ้นงานด้านที่ต้องการกัดกรดลงในน้ำกรดลึกประมาณ $\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{4}$ ก่อน และแกว่งชิ้นงานในน้ำกรดเบาๆ จดบันทึกเวลาที่กัดกรดไว้ด้วย

ง. นำผิวชิ้นงานที่กัดกรดแล้วไปล้างแอลกอฮอล์ (ขามรูปไตขามแรก ขวามือสุด) โดยจุ่มชิ้นงานด้านที่กัดกรดแล้วลงในแอลกอฮอล์ ลึกกว่าการกัดกรด และแกว่งชิ้นงานในแอลกอฮอล์เบาๆ

จ. นำผิวชิ้นงานไปเป่าด้วยลมร้อนให้แห้งและเช็ดด้วยกระดาษเช็ดหูแห้งทันที การเช็ดต้องเช็ดไปทางด้านเดียวกัน ห้ามเช็ดกลับไปมาหรือเป็นวงกลมและห้ามใช้มือเช็ดผิวงานที่ กัดกรดแล้วเด็ดขาด

4.3.3.5 นำชิ้นงานไปส่องดูโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ หากส่องแล้วเห็น โครงสร้าง ไม่ ชัดเจนให้นำชิ้นงานกลับมากัดกรดใหม่ ครั้งละไม่เกิน 10 วินาที โดยทำตามขั้นตอน ก ถึง จ ใน ข้อ 4.3.2.4 ข้างต้น และจดบันทึกเวลาเพิ่มเติมด้วย

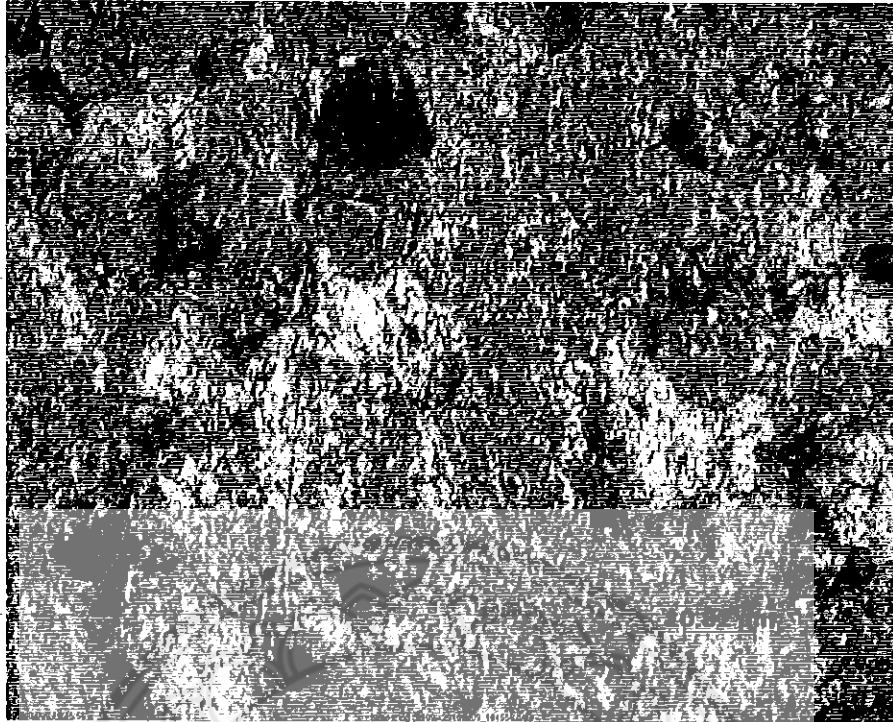
4.3.3.6 นำชิ้นงานไปส่องดูโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ หากส่องแล้วเห็น โครงสร้าง นำชิ้นงานไปถ่ายรูปโครงสร้าง ต้องจดบันทึกค่าลักษณะของรูปถ่ายไว้ด้วยชัดเจน

4.3.3.7 นำเวลาที่ใช้ในการกัดกรดทั้งหมดมารวมกัน เป็นเวลาที่ใช้ในการกัดกรดรวม

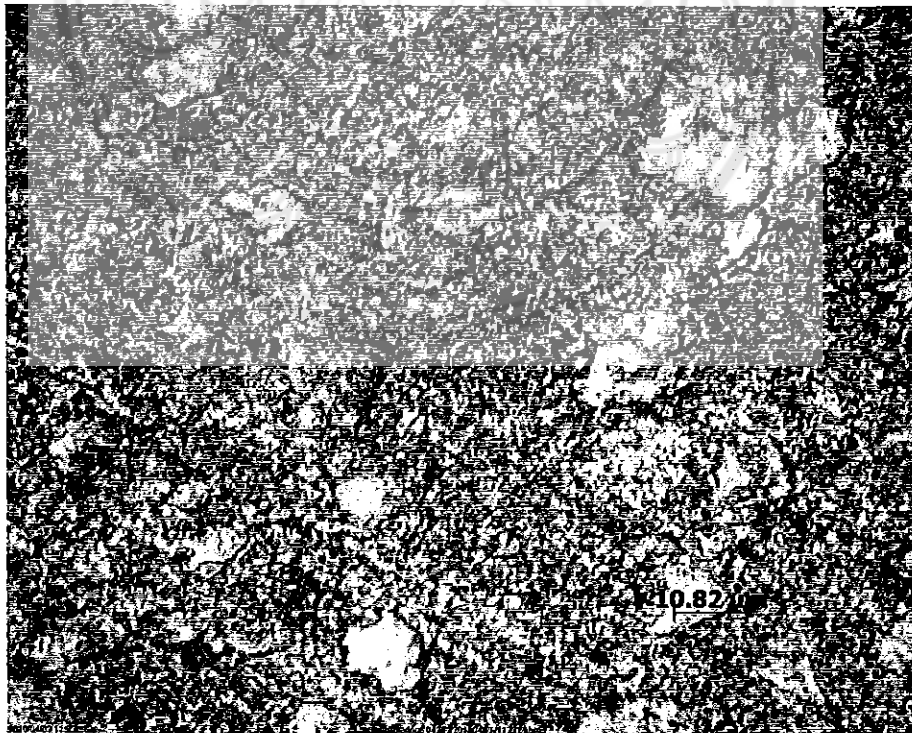
4.3.4 ผลการทดลอง



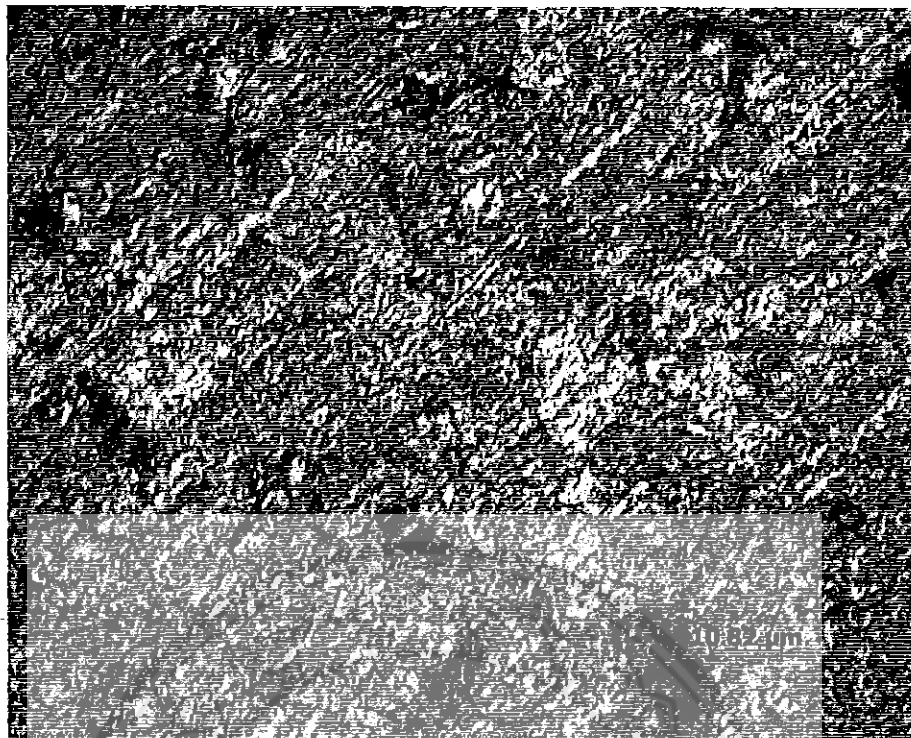
รูปที่ 4.15 รูปโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนการรีดและก่อนการอบปกติ



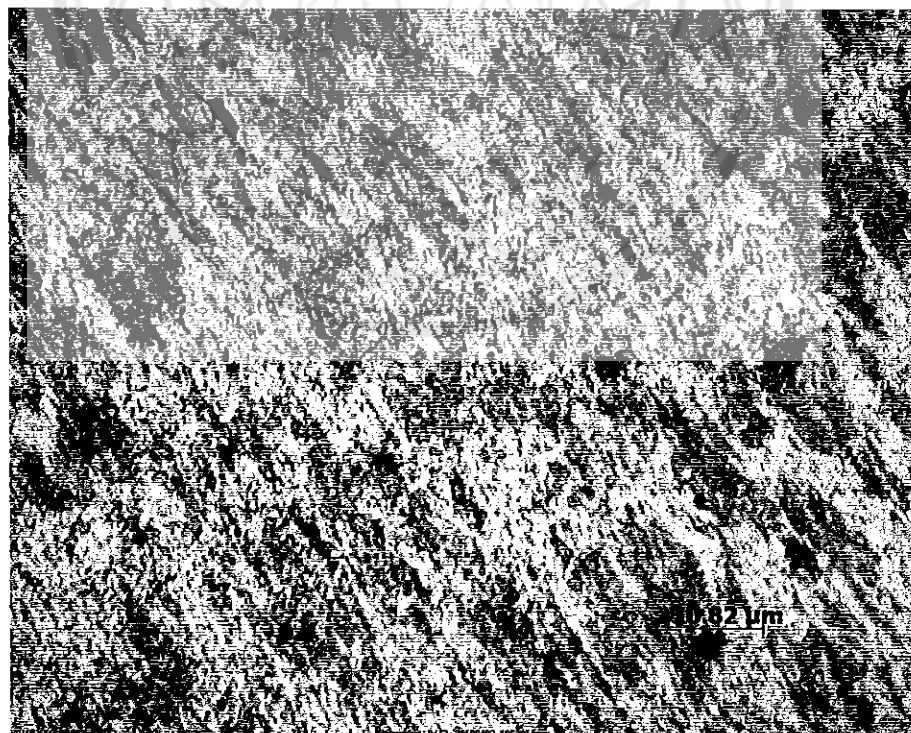
รูปที่ 4.16 รูปโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการริดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การริดที่ 3% และก่อนการอบปกติ



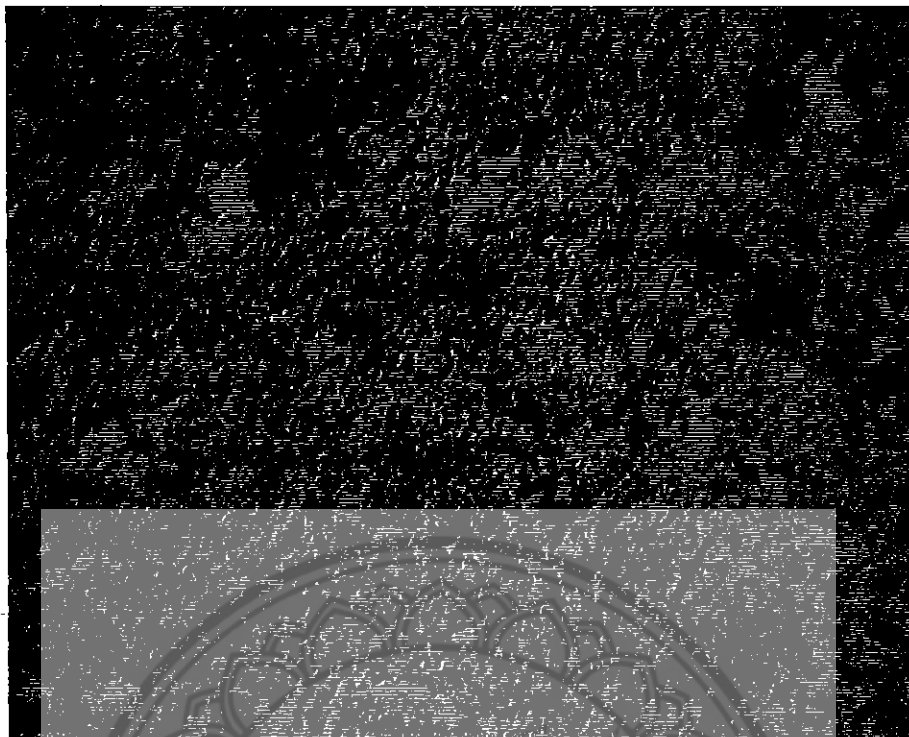
รูปที่ 4.17 รูปโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการริดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การริดที่ 5% และก่อนการอบปกติ



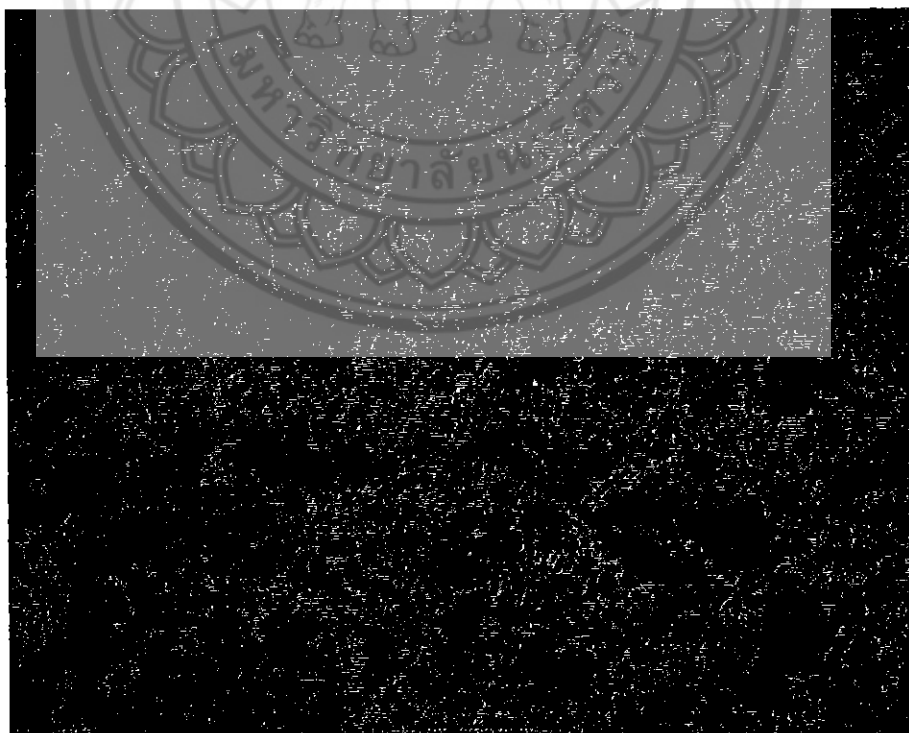
รูปที่ 4.18 รูปโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดที่ 3% และหลังการอบปกติที่อุณหภูมิ 850 °c



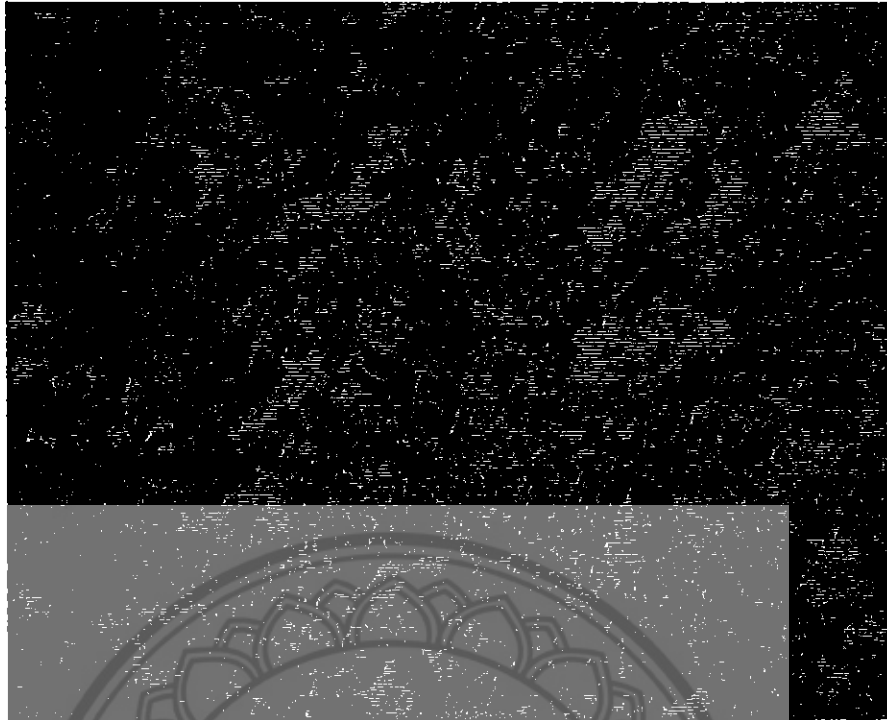
รูปที่ 4.19 รูปโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดที่ 3% และหลังการอบปกติที่อุณหภูมิ 900 °c



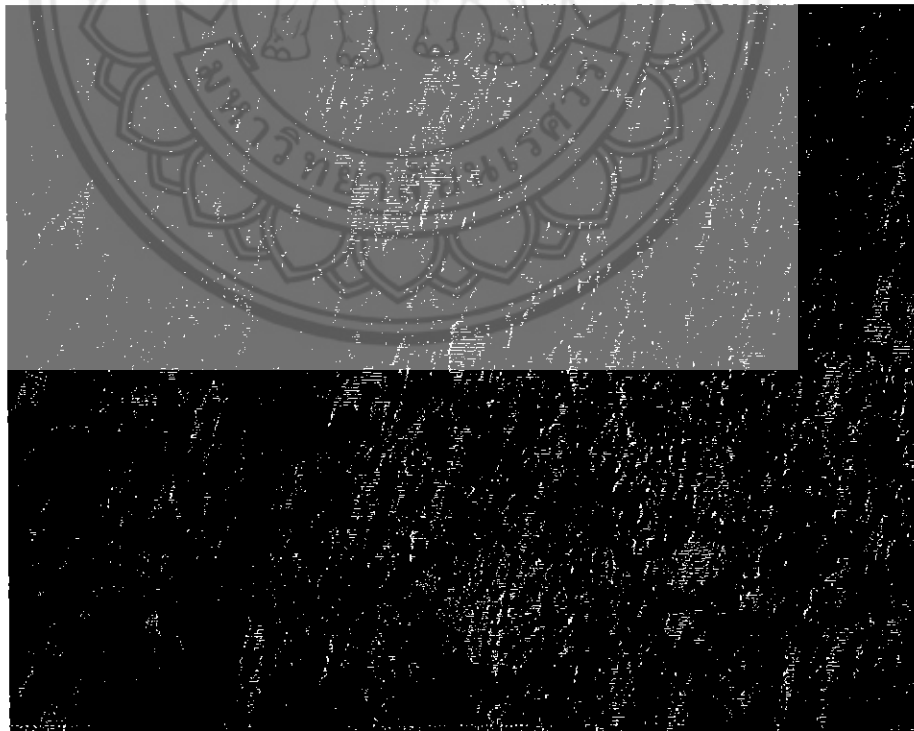
รูปที่ 4.20 รูปโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดที่ 3% และหลังการ อบปกติที่อุณหภูมิ 1000 °c



รูปที่ 4.21 รูปโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดที่ 5% และหลังการ อบปกติที่อุณหภูมิ 850 °c



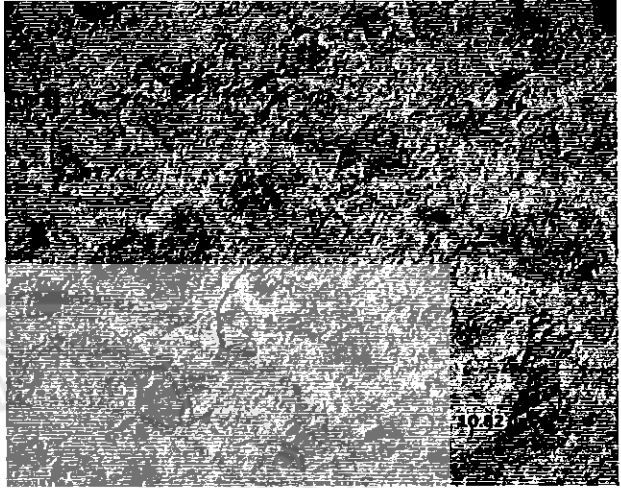
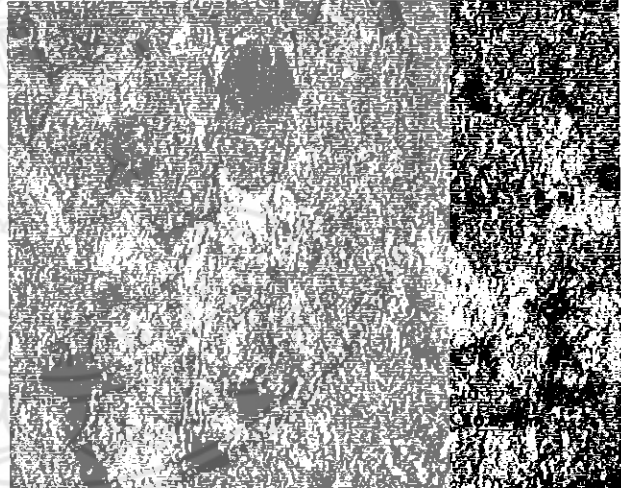
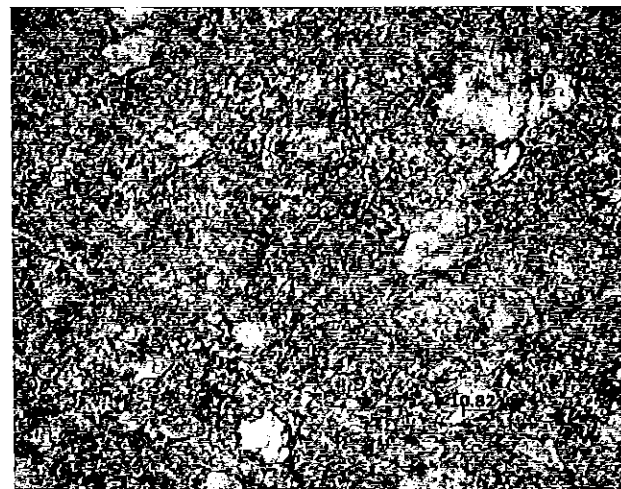
รูปที่ 4.22 รูปโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดที่ 5% และหลังการอบปกติที่อุณหภูมิ 900 °c



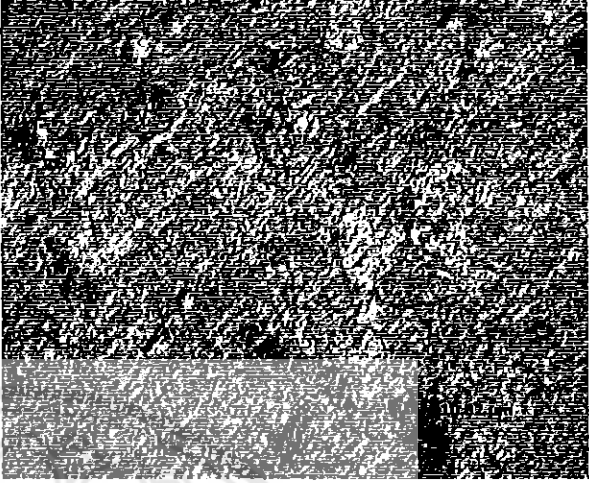
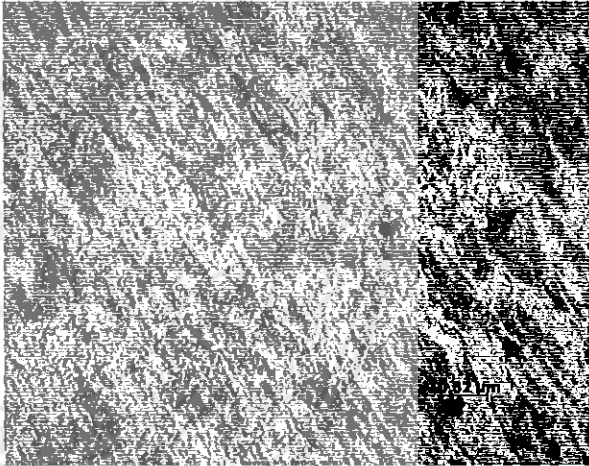
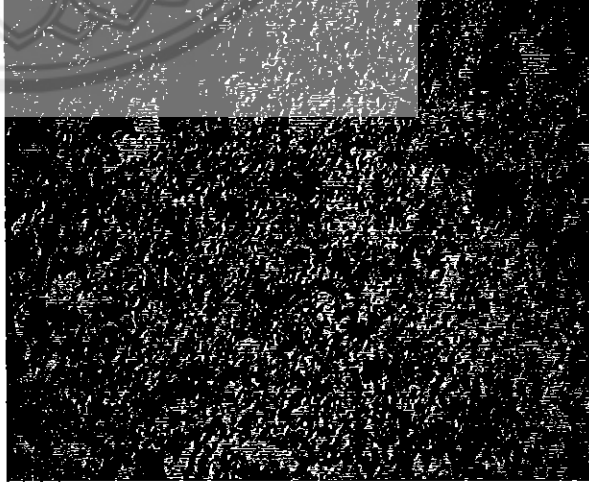
รูปที่ 4.23 รูปโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดที่ 5% และหลังการอบปกติที่อุณหภูมิ 1000 °c

4.3.5 การเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาค

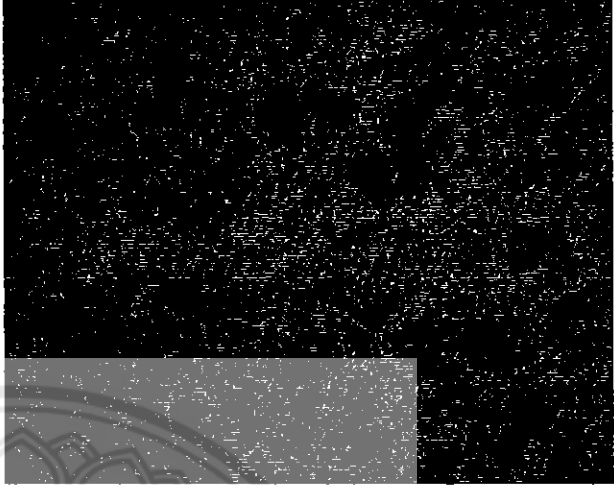
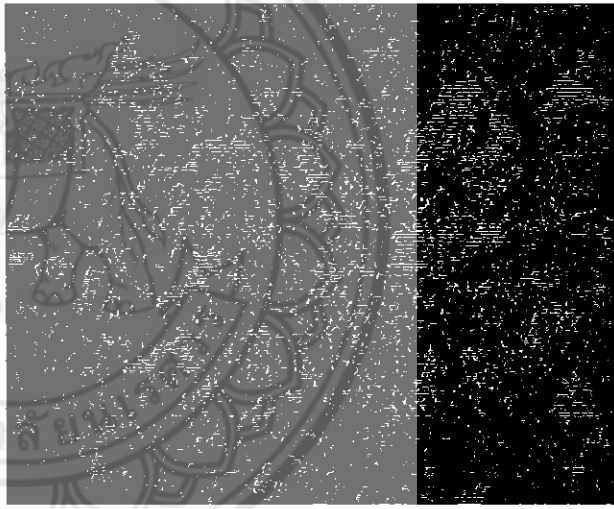
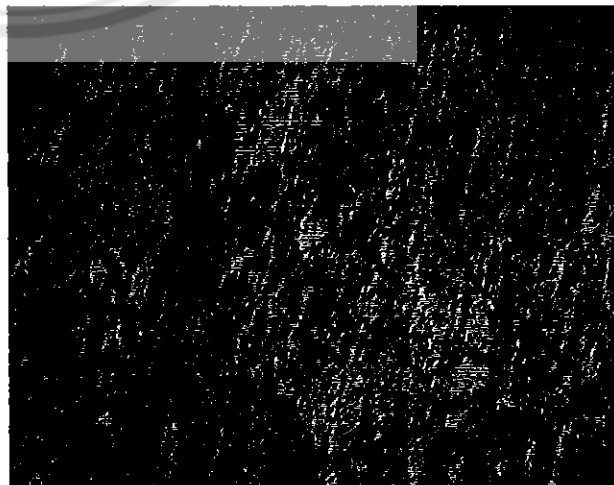
ตารางที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก ST 37 ก่อนการรีดและหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นที่ 3 เปอร์เซ็นต์ และ 5 เปอร์เซ็นต์

<p>ก่อนการรีด</p>	
<p>หลังการรีดเย็นที่ 3 เปอร์เซ็นต์</p>	
<p>หลังการรีดเย็นที่ 5 เปอร์เซ็นต์</p>	

ตารางที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก ST37 ที่ผ่านกระบวนการรีดเย็นที่ 3 เปอร์เซ็นต์ และผ่านการอบปกติที่อุณหภูมิต่างๆ

<p>อบปกติที่อุณหภูมิ 850 °c</p>	
<p>อบปกติที่อุณหภูมิ 900 °c</p>	
<p>อบปกติที่อุณหภูมิ 1000 °c</p>	

ตารางที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบ โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก ST 37 ที่ผ่านกระบวนการรีดเย็น ที่ 5 เปอร์เซ็นต์ และผ่านการอบปกติที่อุณหภูมิต่างๆ

<p>อบปกติที่อุณหภูมิ 850 °c</p>	
<p>อบปกติที่อุณหภูมิ 900 °c</p>	
<p>อบปกติที่อุณหภูมิ 1000 °c</p>	

เปรียบเทียบจากรูปสรุปได้ว่า ที่ตัวกลางในการเย็นตัวเดียวกันแตกต่างกันที่อุณหภูมิอบปกติ จะทำให้ขนาดของเกรนไม่เท่ากัน อุณหภูมิที่สูงขึ้นขนาดของเกรนโตขึ้น จำนวนเกรน ความแข็ง และความทนต่อแรงดึงลดลง แต่ความเหนียวเพิ่มขึ้น และที่ตัวกลางในการเย็นตัวเดียวกันแตกต่างกันที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น จะทำให้ขนาดของเกรนไม่เท่ากัน เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นที่สูงขึ้นขนาดของเกรน ความเหนียวลดลง แต่ความแข็ง ความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น

4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

4.4.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าความแข็งของเหล็ก ST37

การวิเคราะห์ความแปรปรวน 2 ทางเป็นการทดสอบโดยพิจารณาเลือกปัจจัย 2 ปัจจัยพร้อมกัน คือ % Cold Work กับ Temperature ที่ส่งผลต่อค่าความแข็ง

ตารางที่ 4.17 แสดงค่าความแข็งแบบบริเนลล์ (HB)

ชิ้นงาน ที่	ชิ้นงาน ก่อน การรีด และ การอบ	ชิ้นงานหลังการรีด และ ก่อนการนำไปอบ		ชิ้นงานหลังการรีดและหลังการนำไปอบ					
		เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็น ที่ 3%	เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็น ที่ 5%	เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็นที่ 3%			เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็นที่ 5%		
				อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ
				850°c	900°c	1000°c	850°c	900°c	1000°c
1	177.0	170.0	175.8	144.0	150.3	139.3	143.3	154.3	140.6
2	163.3	182.3	196	147.3	150.0	154.6	150.6	156.3	147.3
3	160.3	163.7	179.6	147.3	134.6	138.6	156.6	150.6	140.0
4	159.3	178.3	181.5	148.6	142.0	139.3	160.0	152.3	140.6
5	158.6	179.6	190.8	152.0	140.0	140.0	160.3	152.3	137.3
เฉลี่ย	163.7	174.8	184.7	147.8	143.4	142.2	154.2	153.1	141.1

ตารางที่ 4.18 แสดงการวิเคราะห์ ANOVA ของค่าความแข็ง

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F _c
% Cold Work	494.91	1	494.91225	12.66525
Temperature	9320.74	3	3106.91425	79.50876
Interaction	285.91	3	95.30291667	2.438888
Error	1250.44	32	39.076375	
Total	11352.01	39		

สมมติฐาน

- สำหรับอิทธิพลร่วม ระหว่าง % Cold Work กับ Temperature
 H_0 : ไม่มีอิทธิพลร่วม ระหว่าง % Cold Work กับ Temperature
 H_1 : มีอิทธิพลร่วม ระหว่าง % Cold Work กับ Temperature
- สำหรับองค์ประกอบ % Cold Work
 H_0 : ความแข็งในกลุ่ม % Cold Work 5% กับ % Cold Work 3% ไม่แตกต่างกัน
 H_1 : ความแข็งในกลุ่มที่ % Cold Work 5% กับ % Cold Work 3% แตกต่างกัน
- สำหรับองค์ประกอบ Temperature
 H_0 : ความแข็งในแต่ละกลุ่มระดับ Temperature ไม่แตกต่างกัน
 H_1 : มีอย่างน้อย 2 กลุ่มระดับ Temperature ที่มีความแข็งแตกต่างกัน

สถิติที่ใช้ทดสอบ

สำหรับอิทธิพลร่วมระหว่าง %Cold Work กับ Temperature $F = \frac{MS_{Cold\ and\ Tem}}{MS_E} = 2.438888$; $df = 3$

สำหรับองค์ประกอบ % Cold Work $F = \frac{MS_{cold}}{MS_E} = 12.66525$; $df = 1$

สำหรับองค์ประกอบ Temperature $F = \frac{MS_{tem}}{MS_E} = 79.50876$; $df = 3$

อาณาเขตวิกฤต

กำหนด $\alpha = .05$ ค่า F ที่อาณาเขตวิกฤต ของ $F_{.05,1,32}$ มีค่าเป็น 4.152 และค่า F ที่อาณาเขตวิกฤต ของ $F_{.05,3,32}$ มีค่าเป็น 2.904(ทั้งสองค่าเกิดจากการเปิดตารางค่า $F_{.05,1,30} = 4.17$ กับ $F_{.05,1,40} = 4.08$ และ $F_{.05,3,30} = 2.92$ กับ $F_{.05,3,40} = 2.84$ แล้วนำมาเทียบบัญญัติไตรยางค์เพื่อหาค่า $F_{.05,1,32}$ และ $F_{.05,3,32}$)

การสรุปผล

1. สำหรับอิทธิพลร่วม ระหว่าง % Cold Work กับ Temperature

ค่า $F = 2.438888$ จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า ค่า $F_{.05,3,32} = 2.904$ จากการเปิดตาราง ตก
ใน ปฏิเสธ H_1 ยอมรับ H_0

สรุปว่า ไม่มีอิทธิพลร่วม ระหว่าง % Cold Work กับ Temperature
เนื่องจากไม่มีอิทธิพลร่วม ระหว่าง 2 ปัจจัย จึงทำการอ่านผลเพื่อสรุปต่อไป

2. สำหรับองค์ประกอบ % Cold Work

ค่า $F = 12.66525$ จากการคำนวณมีค่ามากกว่าค่า $F_{.05,1,32} = 4.152$ จากการเปิดตาราง
ตกในอาณาเขตวิกฤต ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1

สรุปว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ความแข็งในกลุ่มที่ % Cold Work 5% กับ % Cold Work
3% แตกต่างกัน

3. สำหรับองค์ประกอบระดับ Temperature

ค่า $F = 79.50876$ จากการคำนวณมีค่ามากกว่า ค่า $F_{.05,3,32} = 2.904$ จากการเปิดตาราง ตก
ในอาณาเขตวิกฤต ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1

สรุปว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 มีอย่างน้อย 2 กลุ่มระดับ Temperature ที่มีความแข็ง
แตกต่างกัน

4.4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าความทนต่อแรงดึงของเหล็ก ST37

การวิเคราะห์ความแปรปรวน 2 ทางเป็นการทดสอบโดยพิจารณาเลือกปัจจัย 2 ปัจจัย
พร้อมกัน คือ % Cold Work กับ Temperature ที่ส่งผลต่อค่าความทนต่อแรงดึง

ตารางที่ 4.19 แสดงค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุด Yield Point ของเหล็ก ST 37 (หน่วย:Mpa)

ชิ้นงาน ที่	ชิ้นงาน ก่อน การรีด และ ก่อน การอบ	ชิ้นงานหลังการรีด และ ก่อนการนำไปอบ		ชิ้นงานหลังการรีดและหลังการนำไปอบ					
		เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็น ที่ 3%	เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็น ที่ 5%	เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็นที่ 3%			เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็นที่ 5%		
				อุณหภูมิ 850 °c	อุณหภูมิ 900 °c	อุณหภูมิ 1000 °c	อุณหภูมิ 850 °c	อุณหภูมิ 900 °c	อุณหภูมิ 1000 °c
1	377.95	408.19	430.66	390.55	377.95	371.65	384.25	390.55	365.371
2	403.15	411.96	434.54	384.26	366.61	384.26	377.96	384.27	377.95
3	413.23	405.03	428.34	365.35	384.26	357.79	384.26	352.77	365.37
4	385.51	410.07	430.86	371.67	365.36	377.96	390.55	352.75	352.75
5	438.43	415.12	435.70	384.251	377.96	359.07	390.55	396.85	396.85
ค่าเฉลี่ย	403.65	410.07	432.02	379.21	374.43	370.15	385.51	375.44	371.66

ตารางที่ 4.20 แสดงการวิเคราะห์ ANOVA ค่าความทนต่อแรงดึง

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F _c
% Cold Work	591.5917225	1	591.5917225	4.360894
Temperature	15850.46503	3	5283.488345	38.94702
Interraction	719.8984017	3	239.9661339	1.768901
Error	4341.067014	32	135.6583442	
Total	21503.02217	39		

สมมติฐาน

1. สำหรับอิทธิพลร่วม ระหว่าง % Cold Work กับ Temperature
 H_0 : ไม่มีอิทธิพลร่วม ระหว่าง % Cold Work กับ Temperature
 H_1 : มีอิทธิพลร่วม ระหว่าง % Cold Work กับ Temperature
2. สำหรับองค์ประกอบ % Cold Work
 H_0 : ความทนต่อแรงดึงในกลุ่ม % Cold Work 5% กับ % Cold Work 3% ไม่แตกต่างกัน
 H_1 : ความทนต่อแรงดึงในกลุ่มที่ % Cold Work 5% กับ % Cold Work 3% แตกต่างกัน
3. สำหรับองค์ประกอบ Temperature
 H_0 : ความทนต่อแรงดึงในแต่ละกลุ่มระดับ Temperature ไม่แตกต่างกัน
 H_1 : มีอย่างน้อย 2 กลุ่มระดับ Temperature ที่มีความทนต่อแรงดึงแตกต่างกัน

สถิติที่ใช้ทดสอบ

สำหรับอิทธิพลร่วมระหว่าง % Cold Work กับ Temperature $F = \frac{MS_{\text{Cold and Tem}}}{MS_E} = 1.768901$; $df = 3$

สำหรับองค์ประกอบ % Cold Work $F = \frac{MS_{\text{cold}}}{MS_E} = 4.360894$; $df = 1$

สำหรับองค์ประกอบ Temperature $F = \frac{MS_{\text{tem}}}{MS_E} = 38.94702$; $df = 3$

อาณาเขตวิกฤต

กำหนด $\alpha = .05$ ค่า F ที่อาณาเขตวิกฤต ของ $F_{.05,1,32}$ มีค่าเป็น 4.152 และค่า F ที่อาณาเขตวิกฤต ของ $F_{.05,3,32}$ มีค่าเป็น 2.904 (ทั้งสองค่าเกิดจากการเปิดตารางค่า $F_{.05,1,30} = 4.17$ กับ $F_{.05,1,40} = 4.08$ และ $F_{.05,3,30} = 2.92$ กับ $F_{.05,3,40} = 2.84$ แล้วนำมาเทียบบัญญัติไตรยางค์เพื่อหาค่า $F_{.05,1,32}$ และ $F_{.05,3,32}$)

การสรุปผล

1. สำหรับอิทธิพลร่วม ระหว่าง % Cold Work กับ Temperature

ค่า $F = 1.768901$ จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า ค่า $F_{.05,3,32} = 2.904$ จากการเปิดตารางปฏิเสธ H_1 ขอมรับ H_0

สรุปว่า ไม่มีอิทธิพลร่วม ระหว่าง % Cold Work กับ Temperature เนื่องจากไม่มีอิทธิพลร่วม ระหว่าง 2 ปัจจัย จึงทำการอ่านผลเพื่อสรุปต่อไป

2. สำหรับองค์ประกอบ % Cold Work

ค่า $F = 4.360894$ จากการคำนวณมีค่ามากกว่าค่า $F_{.05,1,32} = 4.152$ จากการเปิดตารางตกในอาณาเขตวิกฤต ปฏิเสธ H_0 ขอมรับ H_1

สรุปว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ความทนต่อแรงดึงในกลุ่มที่ % Cold Work 5% กับ % Cold Work 3% แตกต่างกัน

3. สำหรับองค์ประกอบ ระดับTemperature

ค่า $F = 38.94702$ จากการคำนวณมีค่ามากกว่า ค่า $F_{0.05,3,32} = 2.904$ จากการเปิดตาราง ตก

ในอาณาเขตวิกฤต ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1

สรุปว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 มีอย่างน้อย 2 กลุ่มระดับ Temperature ที่มีความทนต่อแรงดึงแตกต่างกัน

4.4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเหล็ก ST37

การวิเคราะห์ความแปรปรวน 2 ทางเป็นการทดสอบโดยพิจารณาเลือกปัจจัย 2 ปัจจัยพร้อมกัน คือ % Cold Work กับ Temperature ที่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเหล็ก

ตารางที่ 4.21 แสดงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเหล็ก ST 37 (หน่วย : Mpa)

ชิ้นงาน ที่	ชิ้นงาน ก่อน การรีด และ ก่อน การอบ	ชิ้นงานหลังการรีด และ ก่อนการนำไปอบ		ชิ้นงานหลังการรีดและหลังการนำไปอบ					
		เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็น ที่ 3%	เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็น ที่ 5%	เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็นที่ 3%			เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็นที่ 5%		
				อุณหภูมิ 850 °c	อุณหภูมิ 900 °c	อุณหภูมิ 1000 °c	อุณหภูมิ 850 °c	อุณหภูมิ 900 °c	อุณหภูมิ 1000 °c
		1	1323.82	1686.73	3090.11	2566.03	1204.43	930.52	3091.32	2251.06	1358.76
2	1308.50	1655.82	4749.12	3129.15	1658.13	1280.46	2992.63	1928.14	952.982
3	1090.60	3420.94	2571.10	917.74	4158.66	1532.31	3076.54	2408.00	1423.89
4	1077.75	1896.75	6068.53	1784.30	1223.58	1090.48	3349.56	1027.54	1310.38
5	875.79	1467.36	2572.04	1581.28	1046.13	1020.09	1952.75	1907.93	1556.27
ค่าเฉลี่ย	1102.39	1850.03	4064.97	1686.31	1454.44	1134.31	2785.13	2099.78	1284.86

ตารางที่ 4.22 แสดงการวิเคราะห์ ANOVA ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F_c
% Cold Work	5173064.318	1	5173064.318	6.71370368
Tempurature	15628919.9	3	5209639.968	6.76117227
Interraction	4861737.488	3	1620579.163	2.10321922
Error	24656741.81	32	770523.1817	
Total	50320463.52	39		

สมมติฐาน

1. สำหรับอิทธิพลร่วม ระหว่าง % Cold Work กับ Temperature

H_0 : ไม่มีอิทธิพลร่วม ระหว่าง % Cold Work กับ Temperature

H_1 : มีอิทธิพลร่วม ระหว่าง % Cold Work กับ Temperature

2. สำหรับองค์ประกอบ % Cold Work

H_0 : โมดูลัสความยืดหยุ่นในกลุ่ม % Cold Work 5% กับ % Cold Work 3% ไม่แตกต่างกัน

H_1 : โมดูลัสความยืดหยุ่นในกลุ่มที่ % Cold Work 5% กับ % Cold Work 3% แตกต่างกัน

3. สำหรับองค์ประกอบ Temperature

H_0 : โมดูลัสความยืดหยุ่นในแต่ละกลุ่มระดับ Temperature ไม่แตกต่างกัน

H_1 : มีอย่างน้อย 2 กลุ่มระดับ Temperature ที่มี โมดูลัสความยืดหยุ่นแตกต่างกัน

สถิติที่ใช้ทดสอบ

สำหรับอิทธิพลร่วมระหว่าง % Cold Work กับ Temperature $F = \frac{MS_{\text{Cold and Tem}}}{MS_E} = 2.103219$; $df = 3$

สำหรับองค์ประกอบ % Cold Work $F = \frac{MS_{\text{cold}}}{MS_E} = 6.71370368$; $df = 1$

สำหรับองค์ประกอบ Temperature $F = \frac{MS_{\text{tem}}}{MS_E} = 6.76117227$; $df = 3$

อาณาเขตวิกฤต

กำหนด $\alpha = .05$ ค่า F ที่อาณาเขตวิกฤต ของ $F_{.05,1,32}$ มีค่าเป็น 4.152 และค่า F ที่อาณาเขตวิกฤต ของ $F_{.05,3,32}$ มีค่าเป็น 2.904 (ทั้งสองค่าเกิดจากการเปิดตารางค่า $F_{.05,1,30} = 4.17$ กับ $F_{.05,1,40} = 4.08$ และ $F_{.05,3,30} = 2.92$ กับ $F_{.05,3,40} = 2.84$ แล้วนำมาเทียบบัญญัติไตรยางค์เพื่อหาค่า $F_{.05,1,32}$ และ $F_{.05,3,32}$)

การสรุปผล

1. สำหรับอิทธิพลร่วม ระหว่าง % Cold Work กับ Temperature

ค่า $F = 2.10321922$ จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า ค่า $F_{.05,3,32} = 2.904$ จากการเปิดตาราง ตกใน ปฏิเสธ H_1 ยอมรับ H_0

สรุปว่า ไม่มีอิทธิพลร่วม ระหว่าง % Cold Work กับ Temperature เนื่องจากไม่มีอิทธิพลร่วม ระหว่าง 2 ปัจจัย จึงทำการอ่านผลเพื่อสรุปต่อไป

2. สำหรับองค์ประกอบ % Cold Work

ค่า $F = 6.71370368$ จากการคำนวณมีค่ามากกว่าค่า $F_{.05,1,32} = 4.152$ จากการเปิดตาราง ตกในอาณาเขตวิกฤต ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1

สรุปว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โมดูลัสความยืดหยุ่นในกลุ่มที่ % Cold Work 5% กับ % Cold Work 3% แตกต่างกัน

3. สำหรับองค์ประกอบ ระดับ Temperature

ค่า $F = 6.76117227$ จากการคำนวณมีค่ามากกว่า ค่า $F_{0.05,3,32} = 2.904$ จากการเปิดตาราง

ตกในอาณาเขตวิกฤต ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H

สรุปว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 มีอย่างน้อย 2 กลุ่มระดับ Temperature ที่มีโมดูลัสความยืดหยุ่นแตกต่างกัน

4.4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของเหล็ก ST37

การวิเคราะห์ความแปรปรวน 2 ทางเป็นการทดสอบโดยพิจารณาเลือกปัจจัย 2 ปัจจัย พร้อมกัน คือ % Cold Work กับ Temperature ที่ส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของเหล็ก

ตารางที่ 4.23 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของเหล็ก ST 37 (หน่วย : เปอร์เซ็นต์)

ชิ้นงาน ที่	ชิ้นงาน ก่อน การรีด และ ก่อน การอบ	ชิ้นงานหลังการรีด และ ก่อนการนำไปอบ		ชิ้นงานหลังการรีดและหลังการนำไปอบ					
		เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็น ที่ 3%	เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็น ที่ 5%	เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็นที่ 3%			เปอร์เซ็นต์ การรีดเย็นที่ 5%		
				อุณหภูมิ 850 °c	อุณหภูมิ 900 °c	อุณหภูมิ 1000 °c	อุณหภูมิ 850 °c	อุณหภูมิ 900 °c	อุณหภูมิ 1000 °c
1	28.55	24.20	3.29	15.22	31.38	39.94	12.43	17.35	26.89
2	30.81	24.88	9.15	12.28	22.11	30.01	12.63	2.27	39.66
3	37.89	11.84	16.66	39.81	9.24	23.35	12.49	14.65	25.66
4	35.77	21.62	7.10	20.83	29.86	34.66	11.66	34.33	26.92
5	50.06	28.29	16.94	24.30	36.13	35.20	20.00	20.80	25.50
ค่าเฉลี่ย	36.62	22.16	10.62	22.48	25.74	32.63	13.84	17.88	28.92

ตารางที่ 4.24 แสดงการวิเคราะห์ ANOVA ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	fo
% Cold Work	630.1978225	1	630.1978225	9.647424
Tempurature	1230.276668	3	410.0922225	6.277923
Interraction	78.4414075	3	26.14713583	0.400275
Error	2090.33308	32	65.32290875	
Total	4029.248978	39		

สมมติฐาน

1. สำหรับอิทธิพลร่วม ระหว่าง % Cold Work กับ Temperature

H_0 : ไม่มีอิทธิพลร่วม ระหว่าง % Cold Work กับ Temperature

H_1 : มีอิทธิพลร่วม ระหว่าง % Cold Work กับ Temperature

2. สำหรับองค์ประกอบ % Cold Work

H_0 : เปอร์เซนต์ความยืดหยุ่นในกลุ่ม % Cold Work 5% กับ % Cold Work 3% ไม่แตกต่างกัน

H_1 : เปอร์เซนต์ความยืดหยุ่นในกลุ่มที่ % Cold Work 5% กับ % Cold Work 3% แตกต่างกัน

3. สำหรับองค์ประกอบ Temperature

H_0 : เปอร์เซนต์ความยืดหยุ่นในแต่ละกลุ่มระดับ Temperature ไม่แตกต่างกัน

H_1 : มีอย่างน้อย 2 กลุ่มระดับ Temperature ที่มีเปอร์เซนต์ความยืดหยุ่นแตกต่างกัน

สถิติที่ใช้ทดสอบ

สำหรับอิทธิพลร่วม ระหว่าง % Cold Work กับ Temperature $F = \frac{MS_{\text{Cold and Tem}}}{MS_E} = 0.4002$; $df = 3$

สำหรับองค์ประกอบ % Cold Work $F = \frac{MS_{\text{cold}}}{MS_E} = 9.647424$; $df = 1$

สำหรับองค์ประกอบ Temperature $F = \frac{MS_{\text{tem}}}{MS_E} = 6.277923$; $df = 3$

อาณาเขตวิกฤต

กำหนด $\alpha = .05$ ค่า F ที่อาณาเขตวิกฤต ของ $F_{.05,1,32}$ มีค่าเป็น 4.152 และค่า F ที่อาณาเขตวิกฤตของ $F_{.05,3,32}$ มีค่าเป็น 2.904 (ทั้งสองค่าเกิดจากการเปิดตารางค่า $F_{.05,1,30} = 4.17$ กับ $F_{.05,1,40} = 4.08$ และ $F_{.05,3,30} = 2.92$ กับ $F_{.05,3,40} = 2.84$ แล้วนำมาเทียบบัญญัติไครยงค์เพื่อหาค่า $F_{.05,1,32}$ และ $F_{.05,3,32}$)

การสรุปผล

1. สำหรับอิทธิพลร่วม ระหว่าง % Cold Work กับ Temperature

ค่า $F = 0.400275$ จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า ค่า $F_{.05,3,32} = 2.904$ จากการเปิดตาราง ตก

ใน ปฏิเสธ H_1 ยอมรับ H_0

สรุปว่า ไม่มีอิทธิพลร่วม ระหว่าง % Cold Work กับ Temperature

เนื่องจากไม่มีอิทธิพลร่วม ระหว่าง 2 ปัจจัย จึงทำการอ่านผลเพื่อสรุปต่อไป

2. สำหรับองค์ประกอบ % Cold Work

ค่า $F = 9.647424$ จากการคำนวณมีค่ามากกว่าค่า $F_{.05,1,32} = 4.152$ จากการเปิดตาราง

ตกในอาณาเขตวิกฤต ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1

สรุปว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เปอร์เซนต์ความยืดหยุ่นในกลุ่มที่ % Cold Work 5% กับ

% Cold Work 3% แตกต่างกัน

3. สำหรับองค์ประกอบ ระดับ Temperature

ค่า $F = 6.277923$ จากการคำนวณมีค่ามากกว่า ค่า $F_{.05,3,32} = 2.904$ จากการเปิดตาราง ตก

ในอาณาเขตวิกฤต ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1

สรุปว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 มีอย่างน้อย 2 กลุ่มระดับ Temperature ที่มีเปอร์เซนต์

ความยืดหยุ่นแตกต่างกัน

บทที่ 5

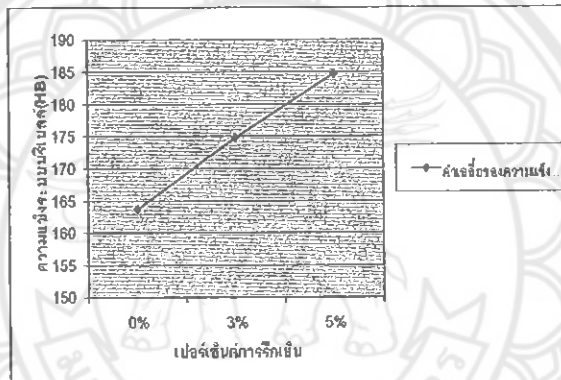
บทสรุปและข้อเสนอนะ

5.1 สรุปผล

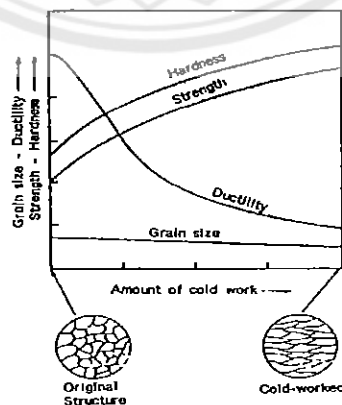
5.1.1 สมบัติเชิงกล

5.1.1.1 ความแข็ง

ก. เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นในการอบปกติมีความสัมพันธ์กับค่าความแข็งของเหล็ก โดยที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นสูงขึ้นค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้น เพราะว่าเหล็กที่ผ่านการรีดเย็นจะมีความเครียดเกิดขึ้นภายในโครงสร้างทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น และจากผลที่ได้จากการทดสอบมีความสอดคล้องกับทฤษฎีดังแสดงในรูปที่ 5.1 และ รูปที่ 5.2



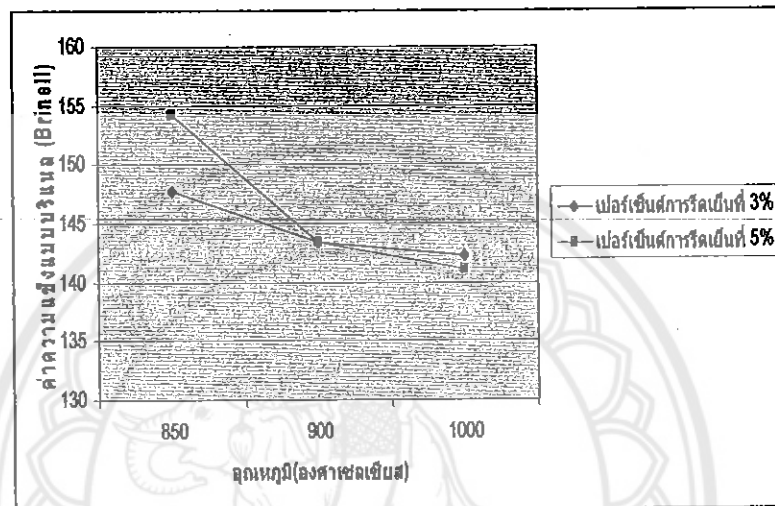
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงการทดสอบความแข็งหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบ



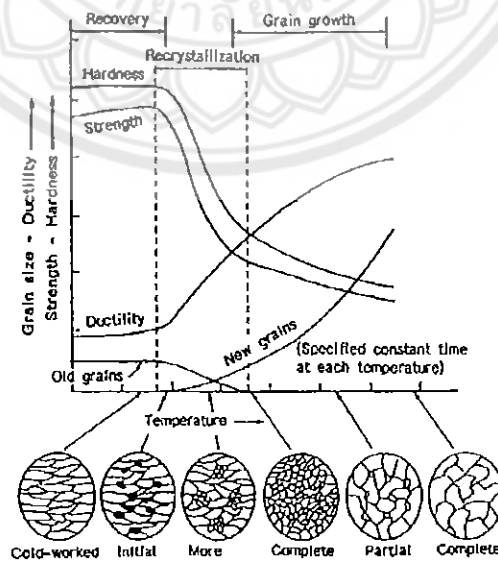
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงการทดสอบความแข็งหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นต่างๆ ตามทฤษฎี

ที่มา: Vladimir B. Ginzburg, Flat Rolling Fundamentals, pp.348

ข. อุณหภูมิการอบปกติมีความสัมพันธ์กับค่าความแข็งของเหล็ก โดยที่อุณหภูมิการอบปกติสูงขึ้นค่าความแข็งจะลดลง เพราะว่าเหล็กที่ผ่านการอบปกติจะมีการจัดเรียงเกรนใหม่ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างและสมบัติเชิงกลของเหล็กเปลี่ยนแปลงไปด้วย เมื่อขนาดเกรนเปลี่ยนแปลงไปจึงทำให้ความแข็งเปลี่ยนไปและผลการทดสอบที่ได้มีความสอดคล้องกับทฤษฎีดังแสดงในรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงการทดสอบความแข็งที่อุณหภูมิการอบปกติต่างๆ ที่ได้จาก การทดสอบ

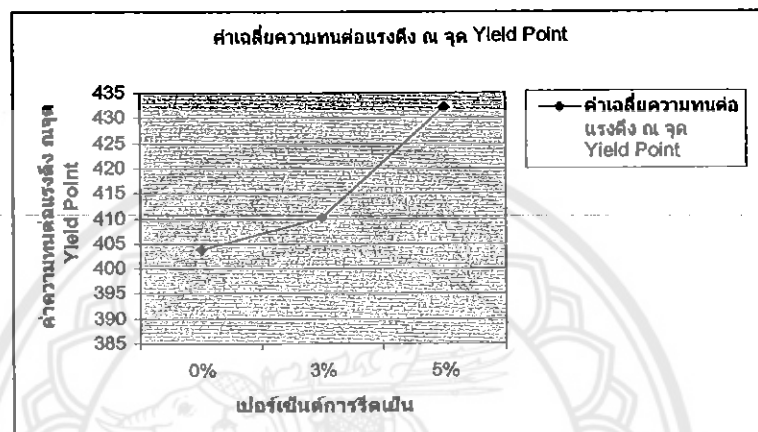


รูปที่ 5.4 กราฟแสดงการทดสอบความแข็งที่อุณหภูมิการอบอ่อนต่างๆ จากทฤษฎี

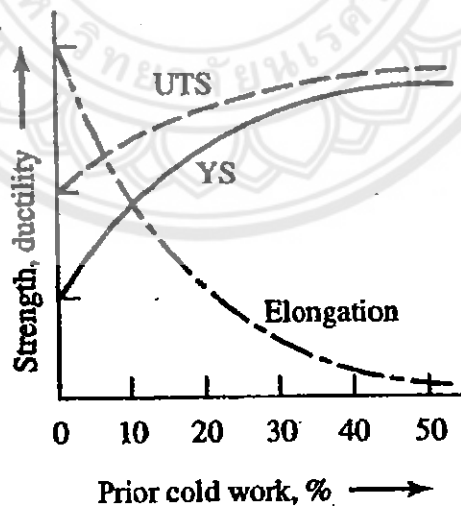
ที่มา: Vladimir B. Ginzburg, Flat Rolling Fundamentals, pp.349

5.1.1.2 ความทนต่อแรงดึง

ก. เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นในการอบปกติมีความสัมพันธ์กับค่าความทนต่อแรงดึงของเหล็ก โดยที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นสูงขึ้นค่าความทนต่อแรงดึงจะเพิ่มขึ้น เพราะว่าเหล็กที่ผ่านการรีดเย็นจะมีความเคียวเกิดขึ้นภายในโครงสร้าง ทำให้ความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นและผลการทดสอบที่ได้มีความสอดคล้องกับทฤษฎีดังแสดงในรูปที่ 5.5 และ รูปที่ 5.6



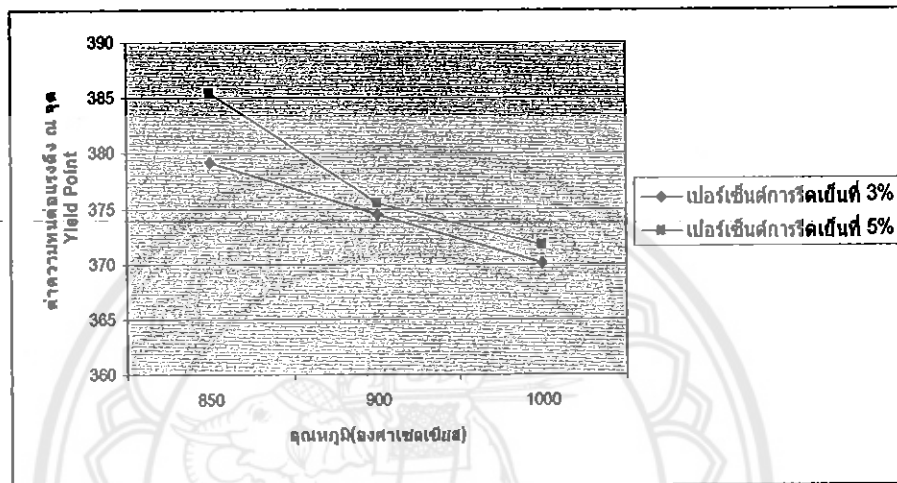
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงการทดสอบความทนต่อแรงดึงหลังการรีดเย็นที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบ



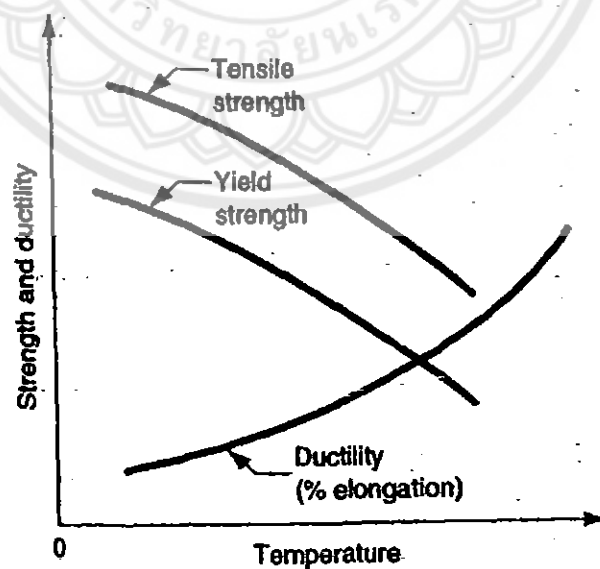
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การรีดเย็นที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นต่างๆจากทฤษฎี

ที่มา: John A. Schey. Introduction to Manufacturing Processes Third Edition . (pp. 264)

ข. อุณหภูมิการอบปกติมีความสัมพันธ์กับค่าความทนต่อแรงดึงของเหล็ก โดยเมื่ออุณหภูมิอบปกติสูงขึ้นค่าความทนต่อแรงดึงจะลดลง เพราะว่าเหล็กที่ผ่านการอบปกติจะมีการจัดเรียงเกรนใหม่ ซึ่งจะส่งผลให้โครงสร้างและสมบัติเชิงกลของเหล็กเปลี่ยนแปลงไปด้วย เมื่อขนาดเกรนเปลี่ยนแปลงไปจึงทำให้ความทนต่อแรงดึงเปลี่ยนไป และผลการทดสอบที่ได้มีความสอดคล้องกับทฤษฎีที่แสดงในรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.7 กราฟการทดสอบการทนต่อแรงดึงที่อุณหภูมิการอบปกติต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ

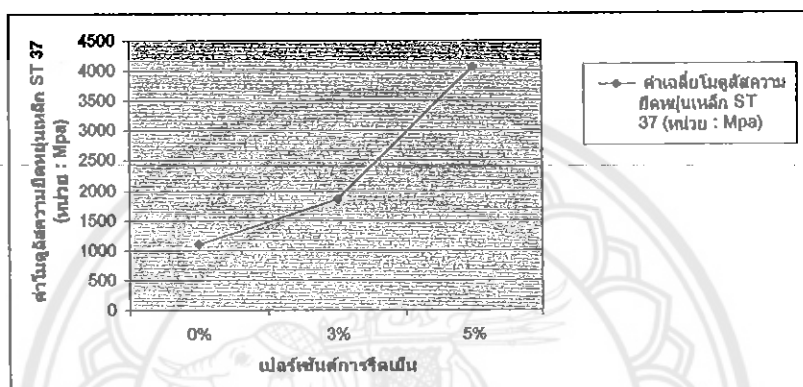


รูปที่ 5.8 อุณหภูมิในการอบปกติที่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น

ที่มา: Mikell P. Groover. Fundamentals of Modern Manufacturing. (pp. 56)

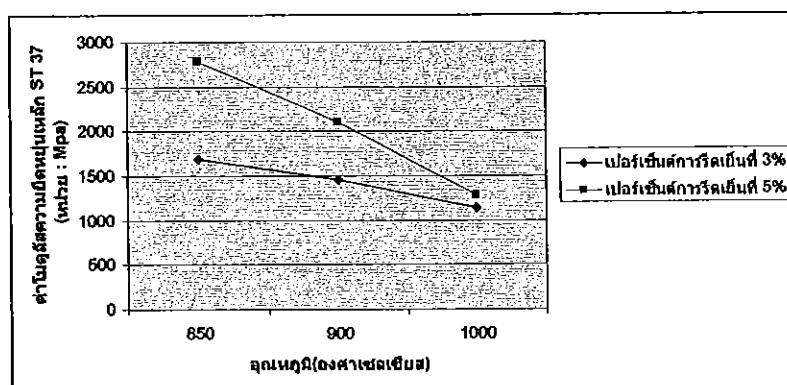
5.1.1.3 โมดูลัสความยืดหยุ่น

ก. เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นในการอบปกติมีความสัมพันธ์กับ โมดูลัสความยืดหยุ่นของเหล็ก โดยที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นสูงขึ้นค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้น เพราะว่าเหล็กที่ผ่านการการรีดเย็นจะมีความเครียดเกิดขึ้นภายในโครงสร้าง จึงทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น ความยืดหยุ่นจะลดลง ส่งผลให้ โมดูลัสความยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้น และผลการทดสอบที่ได้มีความสอดคล้องกับทฤษฎีดังแสดงในรูปที่ 5.9

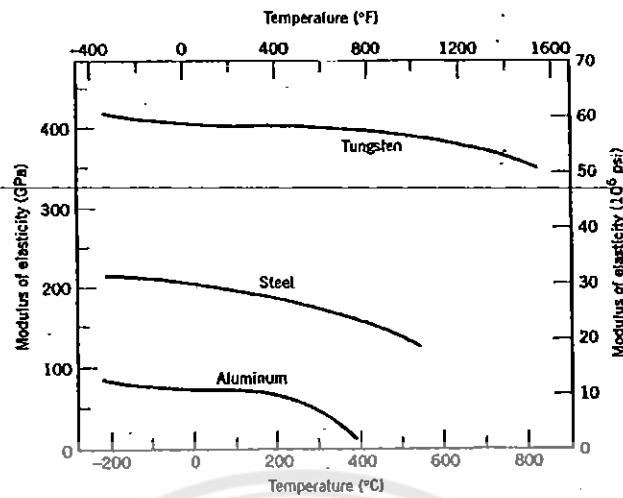


รูปที่ 5.9 กราฟโมดูลัสความยืดหยุ่นที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น ต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ

ข. อุณหภูมิการอบปกติมีความสัมพันธ์กับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเหล็ก โดยเมื่ออุณหภูมิการอบปกติมีค่าสูงขึ้นค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นจะลดลง เพราะว่าเหล็กที่ผ่านการอบปกติจะมีการจัดเรียงเกรนใหม่ ซึ่งจะส่งผลให้ โครงสร้างและสมบัติเชิงกลของเหล็กเปลี่ยนแปลงไป ด้วยเมื่อขนาดเกรนเปลี่ยนแปลง ไปจึงทำให้ โมดูลัสความยืดหยุ่นเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน และผลการทดสอบที่ได้มีความสอดคล้องกับทฤษฎีดังแสดงในรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.10 กราฟโมดูลัสความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิการอบปกติ ต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ

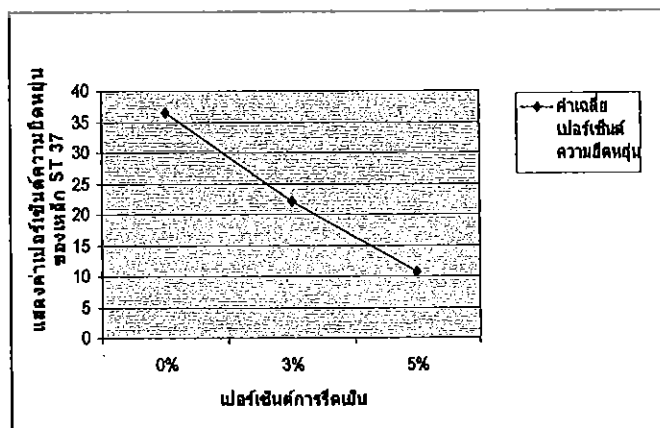


รูปที่ 5.11 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับค่า โมดูลัสของยัง ของเหล็ก อลูมิเนียม และทังสแตน

ที่มา: William D Callister, JR. Material Science and Engineering An Introduction . (pp. 115)

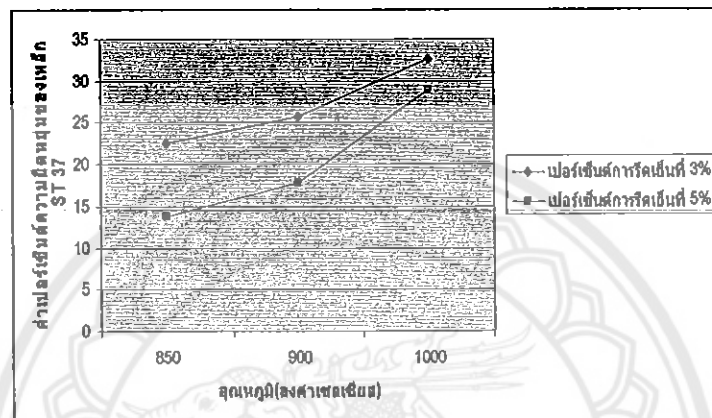
5.1.1.4 เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น

ก. เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นในการอบปกติมีความสัมพันธ์กับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของเหล็ก โดยที่เมื่อเปอร์เซ็นต์การรีดเย็นสูงขึ้นค่าของเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นจะลดลง เพราะว่าเหล็กที่ผ่านการอบปกติจะมีการจัดเรียงเกรนใหม่ ซึ่งจะส่งผลให้โครงสร้างและสมบัติเชิงกลของเหล็กเปลี่ยนแปลงไปด้วย เมื่อขนาดเกรนเปลี่ยนแปลงไปจึงทำให้เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นเปลี่ยนไป และผลการทดสอบที่ได้มีความสอดคล้องกับทฤษฎีดังแสดงในรูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.6

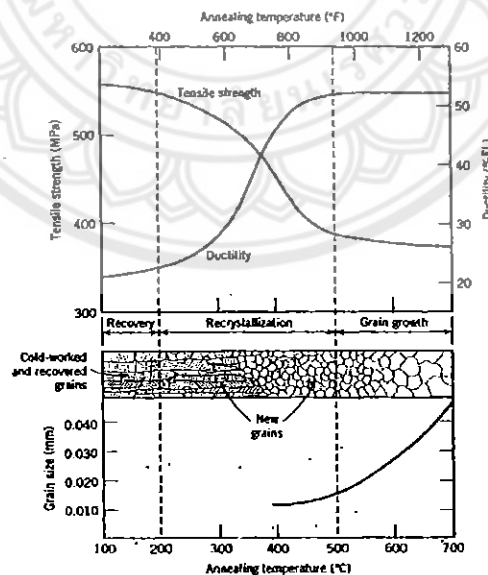


รูปที่ 5.12 กราฟเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นต่างๆที่ได้จากการทดสอบ

ข. อุณหภูมิในการอบปกติมีความสัมพันธ์กับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของเหล็ก โดยเมื่ออุณหภูมิการอบปกติสูงขึ้นค่าของเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้น เพราะว่าเหล็กที่ผ่านการอบปกติจะมีการจัดเรียงเกรนใหม่ ซึ่งจะส่งผลให้โครงสร้างและสมบัติเชิงกลของเหล็กเปลี่ยนแปลงไปด้วย เมื่อขนาดเกรนเปลี่ยนแปลงไปจึงทำให้เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน และผลการทดสอบที่ได้มีความสอดคล้องกับทฤษฎีดังแสดงในรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.13 กราฟเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิการอบปกติ ต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ

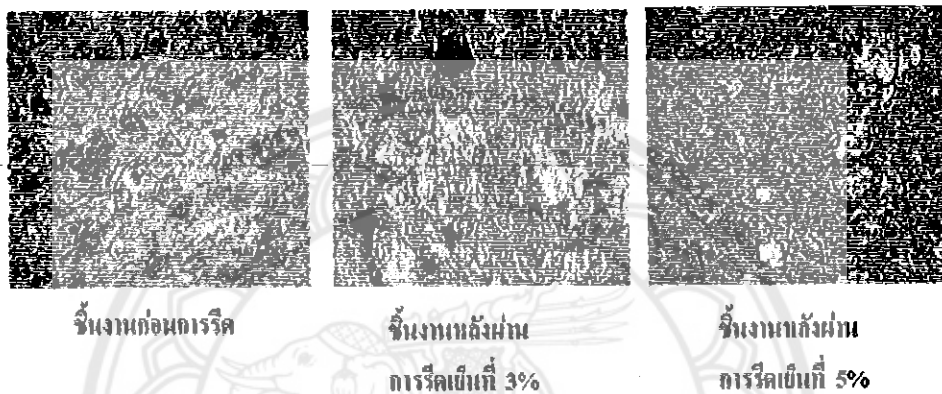


รูปที่ 5.14 อุณหภูมิของการอบอ่อนที่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น และขนาดของเกรน

ที่มา: William D Callister, JR. Matreal Science and Engineering An Introducttiob . (pp. 169)

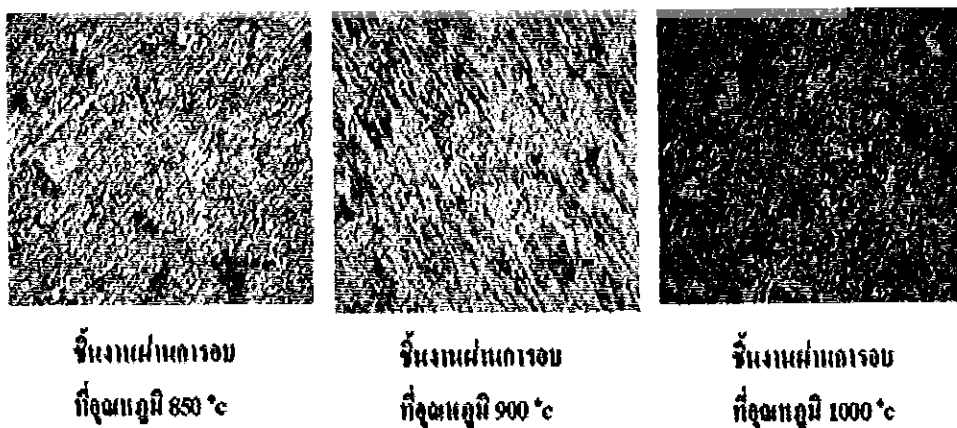
5.1.2 โครงสร้างจุลภาค

5.1.2.1 ที่ตัวกลางในการเชื่อมตัวเดียวกันแตกต่างกันที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็น จะทำให้ขนาดของเกรนไม่เท่ากัน เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นที่สูงขึ้นขนาดของเกรน ความเหนียวลดลง แต่ความแข็งแรง ความทนต่อแรงดึง โมดูลัสความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น เพราะว่าเหล็กที่ผ่านการรีดเย็นจะมีความเครียดเกิดขึ้นภายใน โครงสร้าง ทำให้คุณสมบัติต่างๆเปลี่ยนไป ลักษณะของเกรนที่เกิดขึ้นในแต่ละเปอร์เซ็นต์การรีดเย็นดังแสดงในรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 ลักษณะของเกรนที่เกิดขึ้นในเปอร์เซ็นต์การรีดเย็นต่างๆที่ได้จากการทดสอบ

5.1.2.2 ที่ตัวกลางในการเชื่อมตัวเดียวกันแตกต่างกันที่อุณหภูมิการอบปกติ จะทำให้ขนาดของเกรนไม่เท่ากัน อุณหภูมิที่สูงขึ้นขนาดของเกรน โตขึ้น จำนวนเกรน ความแข็งแรง และความทนต่อแรงดึงลดลง แต่ความเหนียวเพิ่มขึ้น เพราะว่าเหล็กที่ผ่านการอบปกติจะมีการจัดเรียงเกรนใหม่ ซึ่งจะส่งผลให้โครงสร้างและสมบัติเชิงกลของเหล็กเปลี่ยนแปลงไปด้วยลักษณะของเกรนที่เกิดขึ้นในแต่ละเปอร์เซ็นต์การรีดเย็นดังแสดงในรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 ลักษณะของเกรนที่เกิดขึ้นในอุณหภูมิอบปกติ ต่างๆที่ได้จากการทดสอบ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ขั้นตอนกระบวนการอบปกติ ก่อนที่จะเริ่มการปฏิบัติควร มีการเตรียมอุปกรณ์ในการปฏิบัติงานเช่น คีมหนีบเหล็ก หน้ากากป้องกันความร้อน ถุงมือหนัง ชุดหมวกป้องกันความร้อน ภาชนะสำหรับวางชิ้นงาน ควรมีการเตรียมให้พร้อมก่อนทำการปฏิบัติงาน เพื่อสะดวกในการปฏิบัติงาน และป้องกันการเกิดอุบัติเหตุ

5.2.2 ผู้ที่จะปฏิบัติงานในขั้นตอนการอบเหล็ก ควรที่จะมีการศึกษาขั้นตอน วิธีการใช้เครื่องอบและอุปกรณ์ที่ใช้ในการปฏิบัติงานอย่างละเอียด เพื่อความสะดวกและความถูกต้องในการปฏิบัติงาน

5.2.3 ในขั้นตอนการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน ควรมีการตรวจสอบผิวระนาบชิ้นงานว่ามีผิวเรียบเสมอกันตลอดทั้งผิวหรือไม่ เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนของค่าความแข็งของชิ้นงาน

5.2.4 การส่งคู่มือโครงสร้างทางจุลภาค ผู้ปฏิบัติงานควรมีการศึกษาขั้นตอนการส่งโครงสร้าง และวิธีการใช้กล้อง เพื่อการปฏิบัติงานอย่างระมัดระวัง

5.2.5 ในการศึกษาและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองควรมีการศึกษาค้นคว้าข้อมูลอ้างอิงให้มากขึ้นเพื่อที่จะนำมาอ้างอิงและประกอบผลการทดลอง

5.2.6 ในขั้นตอนการรีดเย็นของชิ้นงานจะใช้เวลานาน เพราะต้องทำการรีดด้วยมือ ไม่ได้รีดด้วยเครื่องดังนั้นค่าที่ได้จากการรีดจึงมีความแปรปรวนมากกว่าการใช้เครื่องแบบอัตโนมัติ

เอกสารอ้างอิง

ฉัตรชัย วัชรชัยโสภณ, สิริชาญชัย ทรัพย์ผลไทย. (2548). การจัดทำตัวอย่างอ้างอิงทางโลหะวิทยา
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร. ปรินูญานินพจน์,

มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก

ชวลิต เขียวกุล. (2542). โลหะวิทยา. (พิมพ์ครั้งที่ 2). สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) 5-7
ซอยสุขุมวิท 29 ถนนสุขุมวิท แขวงคลองเตย เขตวัฒนา กรุงเทพฯ 10110: บริษัทดวงกมล
จำกัด.

ดร.ชาญวุฒิ ตั้งจิตวิทยา, สาโรช จูติเกียรติพงศ์. (2539). วัสดุในงานวิศวกรรม: บริษัท พีเอรีฟวิ้ง
จำกัด. บริษัท ซีอีคยูเคชั่น จำกัดมหาชน.

ประกอบ บุญยงค์. (2524). โลหะวิทยา 1 ENGINEERING PHYSICAL METALLUGY. (พิมพ์
ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ. โรงพิมพ์ประกอบเมโทร.

(ไม่ปรากฏ วันที่ เดือน ปี เผยแพร่). กรรมวิธีการอบชุบโลหะ. สืบค้นเมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ.

2552. จาก : <http://info.lu.farmingdale.edu/depts/met/met205/normalizing.htm> .

(ไม่ปรากฏวันที่ เดือน ปี เผยแพร่). Cold Rolled Steel Sheet. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ. 2552

จาก : <http://www2.isit.or.th/Cold Rolled Steel Sheet>.

(ไม่ปรากฏวันที่ เดือน ปี เผยแพร่). การวิเคราะห์ความแปรปรวน . สืบค้นเมื่อวันที่ 14 กุมภาพันธ์

พ.ศ. 2553. จาก http://km.nurse.cmu.ac.th/mngt/innovation/.../lesson_08A.doc

(ไม่ปรากฏวันที่ เดือน ปี เผยแพร่). Heat treating Specialties . สืบค้นเมื่อวันที่ 3 พฤษภาคม พ.ศ.

2553. จาก <http://www.riheattreating.com/Heat-treating-Specialties.html>



ภาคผนวก ก

Heat treating specialties

มหาวิทยาลัยนเรศวร

Heat Treating Specialties

1. ANNEALING (300 - 2250°F)

The purpose for this treatment is to remove stresses or soften the material for improved machinability or formability, alter the physical or mechanical properties or produce a defined structure.

2. Process Anneal: (500 - 1400°F)

Low temperature anneal typically used for material (ferrous or nonferrous) that is going to be reworked via cold rolling or drawing. This type of anneal is also applied to material to improve formability for forming/bending operations with reduced risk of distortion associated with intercritical or full annealing.

3. Subcritical Anneal: (500 - 1400°F)

Annealing process conducted at a temperature below the lower critical for ferrous material and below the full anneal temperature for nonferrous materials. Also referred to as "process annealing". This anneal is used to restore ductility to the material for subsequent cold-working/forming operations.

4. Intercritical Anneal: (1335 - 1600°F)

Annealing process typically applied to ferrous material heated to and held at a temperature between the upper and lower critical temperatures for ferrous materials.

5. Intermediate Anneal: (500 - 1400°F)

Annealing process conducted at a temperature below the lower critical for ferrous material and below the full anneal temperature for nonferrous materials. Also referred to as "process annealing".

This anneal is used to restore ductility to the material between cold-working or hot-working operations.

6. Recovery Anneal: (300 - 1000°F)

Annealing process typically applied to cold-worked material to Temperatures used are below those required for recrystallization or new grain formation.

7. Recrystallization Anneal: (330 - 1450°F)

Annealing process typically applied to cold-worked metal to produce a new grain structure without going through a phase change in the case of ferrous materials.

8. Isothermal Anneal: (1300 - 1650°F)

Annealing process for ferrous materials partially or fully austenitized followed by slow cooling to below the lower critical temperature and held for transformation to a soft, coarse pearlite (aggregate of ferrite and iron carbide).

9. Spheroidize Anneal: (1200 - 1400°F)

Annealing process for ferrous materials (medium to high carbon, low alloy steel) to produce a structure of globular carbides in a ferritic matrix for improved formability and machining.

10. Full Anneal: (650 - 1650°F)

Annealing process for ferrous and nonferrous materials to produce the softest, stress-free structure for improved machinability, cold-workability, mechanical or electrical properties, and dimensional stability. For ferrous materials, heat to above the upper critical transformation temperature and hold to obtain full austenitization, and slow cool to ambient temperature. For nonferrous materials, heat at the specified alloy anneal temperature, hold for a specified time, and furnace cool to ambient temperature.

11. Solution Anneal: (900 - 2250°F)

Annealing process for ferrous and nonferrous materials to produce a solid solution of alloy elements for age-hardening or precipitation-hardening, or improved machining, formability, and/or corrosion resistance. This process is comprised of heating to a specified temperature, holding for a specified time, and cooling rapidly to ambient temperature. This process is typically the precursor to an age-hardening operation for precipitation - hardenable alloys.

12. TEMPERING (350°F - 1250°F)

This treatment follows a quenching or air cooling operation. Tempering is generally considered effective in relieving stresses induced by quenching in addition to lowering hardness to within a specified range, or meeting certain mechanical property requirements.

13. NORMALIZING (1600 - 1800°F)

Normalizing is generally applied to ferrous materials to enhance the mechanical properties of the material by refining the microstructure. This treatment will in some instances improve machinability and machine finish. This treatment is sometimes used as precursor to

subsequent surface hardening to improve response to hardening, or to provide desirable base substrate hardness.

14. HARDENING (2250°F max)

Hardening via water-quench, oil-quench, forced- or still-air quench, or aging results in improved mechanical properties, hardness, and toughness of the alloy material.

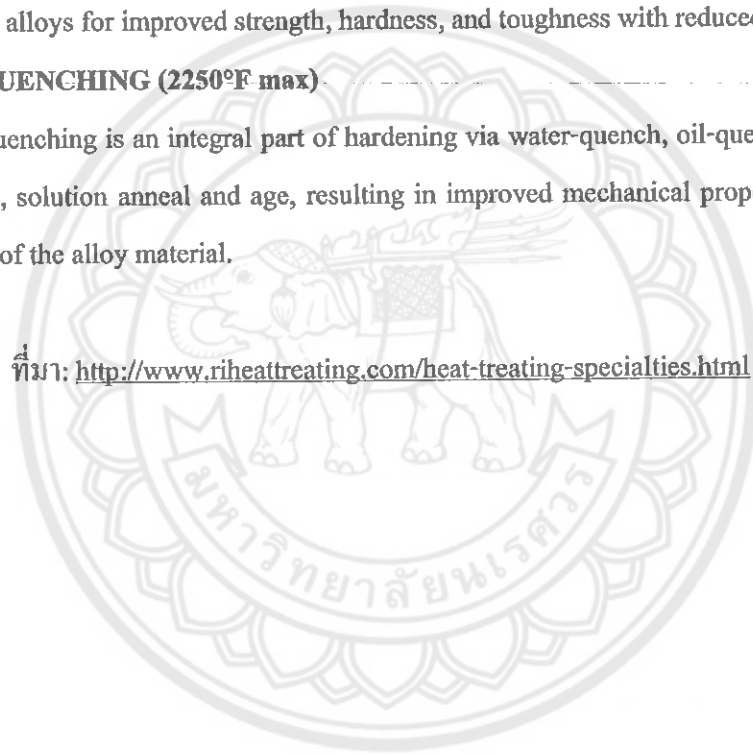
15. Age Hardening (300 - 1400°F):

This process is applied to age-hardenable, or precipitation - hardenable ferrous and nonferrous alloys for improved strength, hardness, and toughness with reduced risk of distortion.

16. QUENCHING (2250°F max)

Quenching is an integral part of hardening via water-quench, oil-quench, forced- or still-air quench, solution anneal and age, resulting in improved mechanical properties, hardness, and toughness of the alloy material.

ที่มา: <http://www.riheattreating.com/heat-treating-specialties.html> 03/05/10







Designation: A 370 - 97a

Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products¹

This standard is issued under the fixed designation A 370; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 These test methods² cover procedures and definitions for the mechanical testing of wrought and cast steel products. The various mechanical tests herein described are used to determine properties required in the product specifications. Variations in testing methods are to be avoided and standard methods of testing are to be followed to obtain reproducible and comparable results. In those cases where the testing requirements for certain products are unique or at variance with these general procedures, the product specification testing requirements shall control.

1.2 The following mechanical tests are described:

	Sections
Tension	5 to 13
Bend	14
Hardness	15
Brinell	16
Rockwell	17
Portable	18
Impact	19 to 28
Keywords	29

1.3 Annexes covering details peculiar to certain products are appended to these test methods as follows:

	Annex
Bar Products	1
Tubular Products	2
Fasteners	3
Round Wire Products	4
Significance of Notched-Bar Impact Testing	5
Converting Percentage Elongation of Round Specimens to Equivalents for Flat Specimens	6
Testing Multi-Wire Strand	7
Rounding of Test Data	8
Methods for Testing Steel Reinforcing Bars	9
Procedure for Use and Control of Heat-Cycle Simulation	10

1.4 The values stated in inch-pound units are to be regarded as the standard.

1.5 When this document is referenced in a metric product specification, the yield and tensile values may be determined in inch-pound (ksi) units then converted into SI (MPa) units. The

elongation determined in inch-pound gage lengths of 2 or 8 in. may be reported in SI unit gage lengths of 50 or 200 mm, respectively, as applicable. Conversely, when this document is referenced in an inch-pound product specification, the yield and tensile values may be determined in SI units then converted into inch-pound units. The elongation determined in SI unit gage lengths of 50 or 200 mm may be reported in inch-pound gage lengths of 2 or 8 in., respectively, as applicable.

1.6 Attention is directed to Practices A 880 and E 1595 when there may be a need for information on criteria for evaluation of testing laboratories.

1.7 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- A 703/A 703M Specification for Steel Castings, General Requirements, for Pressure-Containing Parts³
- A 781/A 781M Specification for Castings, Steel and Alloy, Common Requirements, for General Industrial Use³
- A 833 Practice for Indentation Hardness of Metallic Materials by Comparison Hardness Testers⁴
- A 880 Practice for Criteria for Use in Evaluation of Testing Laboratories and Organizations for Examination and Inspection of Steel, Stainless Steel, and Related Alloys⁵
- E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines⁶
- E 6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing⁶
- E 8 Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials⁶
- E 8M Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]⁶
- E 10 Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials⁶
- E 18 Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials⁶

¹ These test methods and definitions are under the jurisdiction of ASTM Committee A-1 on Steel, Stainless Steel and Related Alloys and are the direct responsibility of Subcommittee A01.11 on Mechanical and Chemical Testing and Processing Methods of Steel Products and Processes.

Current edition approved Jan. 10 and March 10, 1997. Published November 1997. Originally published as A 370 - 53 T. Last previous edition A 370 - 96.

² For ASME Boiler and Pressure Vessel Code applications see related Specification SA-370 in Section II of that Code.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.02.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.05.

⁵ Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.03.

⁶ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

 A 370

E 23 Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials⁶

E 29 Practice for Using Significant Digits in Test Data to Determine Conformance with Specifications⁷

E 83 Practice for Verification and Classification of Extensometers⁶

E 110 Test Method for Indentation Hardness of Metallic Materials by Portable Hardness Testers⁶

E 190 Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds⁶

E 208 Test Method for Conducting Drop-Weight Test to Determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels⁶

E 290 Test Method for Semi-Guided Bend Test for Ductility of Metallic Materials⁶

E 1595 Practice for Evaluating the Performance of Mechanical Testing Laboratories⁶

2.2 Other Document:

ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division I, Part UG-84⁸

3. General Precautions

3.1 Certain methods of fabrication such as bending, forming, and welding, or operations involving heating, may affect the properties of the material under test. Therefore, the product specifications cover the stage of manufacture at which mechanical testing is to be performed. The properties shown by testing prior to fabrication may not necessarily be representative of the product after it has been completely fabricated.

3.2 Improper machining or preparation of test specimens may give erroneous results. Care should be exercised to assure good workmanship in machining. Improperly machined specimens should be discarded and other specimens substituted.

3.3 Flaws in the specimen may also affect results. If any test specimen develops flaws, the retest provision of the applicable product specification shall govern.

3.4 If any test specimen fails because of mechanical reasons such as failure of testing equipment or improper specimen preparation, it may be discarded and another specimen taken.

4. Orientation of Test Specimens

4.1 The terms "longitudinal test" and "transverse test" are used only in material specifications for wrought products and are not applicable to castings. When such reference is made to a test coupon or test specimen, the following definitions apply:

4.1.1 *Longitudinal Test*, unless specifically defined otherwise, signifies that the lengthwise axis of the specimen is parallel to the direction of the greatest extension of the steel during rolling or forging. The stress applied to a longitudinal tension test specimen is in the direction of the greatest extension, and the axis of the fold of a longitudinal bend test specimen is at right angles to the direction of greatest extension (Fig. 1, Fig. 2(a), and 2(b)).

4.1.2 *Transverse Test*, unless specifically defined otherwise, signifies that the lengthwise axis of the specimen is at right

angles to the direction of the greatest extension of the steel during rolling or forging. The stress applied to a transverse tension test specimen is at right angles to the greatest extension, and the axis of the fold of a transverse bend test specimen is parallel to the greatest extension (Fig. 1).

4.2 The terms "radial test" and "tangential test" are used in material specifications for some wrought circular products and are not applicable to castings. When such reference is made to a test coupon or test specimen, the following definitions apply:

4.2.1 *Radial Test*, unless specifically defined otherwise, signifies that the lengthwise axis of the specimen is perpendicular to the axis of the product and coincident with one of the radii of a circle drawn with a point on the axis of the product as a center (Fig. 2(a)).

4.2.2 *Tangential Test*, unless specifically defined otherwise, signifies that the lengthwise axis of the specimen is perpendicular to a plane containing the axis of the product and tangent to a circle drawn with a point on the axis of the product as a center (Fig. 2(a), 2(b), 2(c), and 2(d)).

TENSION TEST

5. Description

5.1 The tension test related to the mechanical testing of steel products subjects a machined or full-section specimen of the material under examination to a measured load sufficient to cause rupture. The resulting properties sought are defined in Terminology E 6.

5.2 In general the testing equipment and methods are given in Test Methods E 8. However, there are certain exceptions to Test Methods E 8 practices in the testing of steel, and these are covered in these test methods.

6. Terminology

6.1 For definitions of terms pertaining to tension testing, including tensile strength, yield point, yield strength, elongation, and reduction of area, reference should be made to Terminology E 6.

7. Testing Apparatus and Operations

7.1 *Loading Systems*— There are two general types of loading systems, mechanical (screw power) and hydraulic. These differ chiefly in the variability of the rate of load application. The older screw power machines are limited to a small number of fixed free running crosshead speeds. Some modern screw power machines, and all hydraulic machines permit stepless variation throughout the range of speeds.

7.2 The tension testing machine shall be maintained in good operating condition, used only in the proper loading range, and calibrated periodically in accordance with the latest revision of Practices E 4.

Note 1—Many machines are equipped with stress-strain recorders for autographic plotting of stress-strain curves. It should be noted that some recorders have a load measuring component entirely separate from the load indicator of the testing machine. Such recorders are calibrated separately.

7.3 *Loading*—It is the function of the gripping or holding device of the testing machine to transmit the load from the heads of the machine to the specimen under test. The essential

⁶ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

⁸ Available from American Society of Mechanical Engineers, 345 E. 47th Street, New York, NY 10017.

 A 370

requirement is that the load shall be transmitted axially. This implies that the centers of the action of the grips shall be in alignment, insofar as practicable, with the axis of the specimen at the beginning and during the test, and that bending or twisting be held to a minimum. For specimens with a reduced section, gripping of the specimen shall be restricted to the grip section. In the case of certain sections tested in full size, nonaxial loading is unavoidable and in such cases shall be permissible.

7.4 Speed of Testing—The speed of testing shall not be greater than that at which load and strain readings can be made accurately. In production testing, speed of testing is commonly expressed (1) in terms of free running crosshead speed (rate of movement of the crosshead of the testing machine when not under load), or (2) in terms of rate of separation of the two heads of the testing machine under load, or (3) in terms of rate of stressing the specimen, or (4) in terms of rate of straining the specimen. The following limitations on the speed of testing are recommended as adequate for most steel products:

Note 2—Tension tests using closed-loop machines (with feedback control of rate) should not be performed using load control, as this mode of testing will result in acceleration of the crosshead upon yielding and elevation of the measured yield strength.

7.4.1 Any convenient speed of testing may be used up to one half the specified yield point or yield strength. When this point is reached, the free-running rate of separation of the crossheads shall be adjusted so as not to exceed $\frac{1}{16}$ in. per min per inch of reduced section, or the distance between the grips for test specimens not having reduced sections. This speed shall be maintained through the yield point or yield strength. In determining the tensile strength, the free-running rate of separation of the heads shall not exceed $\frac{1}{2}$ in. per min per inch of reduced section, or the distance between the grips for test specimens not having reduced sections. In any event, the minimum speed of testing shall not be less than $\frac{1}{10}$ the specified maximum rates for determining yield point or yield strength and tensile strength.

7.4.2 It shall be permissible to set the speed of the testing machine by adjusting the free running crosshead speed to the above specified values, inasmuch as the rate of separation of heads under load at these machine settings is less than the specified values of free running crosshead speed.

7.4.3 As an alternative, if the machine is equipped with a device to indicate the rate of loading, the speed of the machine from half the specified yield point or yield strength through the yield point or yield strength may be adjusted so that the rate of stressing does not exceed 100,000 psi (690 MPa)/min. However, the minimum rate of stressing shall not be less than 10,000 psi (70 MPa)/min.

8. Test Specimen Parameters

8.1 Selection—Test coupons shall be selected in accordance with the applicable product specifications.

8.1.1 Wrought Steels—Wrought steel products are usually tested in the longitudinal direction, but in some cases, where size permits and the service justifies it, testing is in the transverse, radial, or tangential directions (see Fig. 1 and Fig. 2).

8.1.2 Forged Steels—For open die forgings, the metal for

tension testing is usually provided by allowing extensions or prolongations on one or both ends of the forgings, either on all or a representative number as provided by the applicable product specifications. Test specimens are normally taken at mid-radius. Certain product specifications permit the use of a representative bar or the destruction of a production part for test purposes. For ring or disk-like forgings test metal is provided by increasing the diameter, thickness, or length of the forging. Upset disk or ring forgings, which are worked or extended by forging in a direction perpendicular to the axis of the forging, usually have their principal extension along concentric circles and for such forgings tangential tension specimens are obtained from extra metal on the periphery or end of the forging. For some forgings, such as rotors, radial tension tests are required. In such cases the specimens are cut or trepanned from specified locations.

8.1.3 Cast Steels—Test coupons for castings from which tension test specimens are prepared shall be in accordance with the requirements of Specifications A 703/A 703M or A 781/A 781M, as applicable.

8.2 Size and Tolerances—Test specimens shall be the full thickness or section of material as-rolled, or may be machined to the form and dimensions shown in Figs. 3-6, inclusive. The selection of size and type of specimen is prescribed by the applicable product specification. Full section specimens shall be tested in 8-in. (200-mm) gage length unless otherwise specified in the product specification.

8.3 Procurement of Test Specimens—Specimens shall be sheared, blanked, sawed, trepanned, or oxygen-cut from portions of the material. They are usually machined so as to have a reduced cross section at mid-length in order to obtain uniform distribution of the stress over the cross section and to localize the zone of fracture. When test coupons are sheared, blanked, sawed, or oxygen-cut, care shall be taken to remove by machining all distorted, cold-worked, or heat-affected areas from the edges of the section used in evaluating the test.

8.4 Aging of Test Specimens—Unless otherwise specified, it shall be permissible to age tension test specimens. The time-temperature cycle employed must be such that the effects of previous processing will not be materially changed. It may be accomplished by aging at room temperature 24 to 48 h, or in shorter time at moderately elevated temperatures by boiling in water, heating in oil or in an oven.

8.5 Measurement of Dimensions of Test Specimens:

8.5.1 Standard Rectangular Tension Test Specimens—These forms of specimens are shown in Fig. 3. To determine the cross-sectional area, the center width dimension shall be measured to the nearest 0.005 in. (0.13 mm) for the 8-in. (200-mm) gage length specimen and 0.001 in. (0.025 mm) for the 2-in. (50-mm) gage length specimen in Fig. 3. The center thickness dimension shall be measured to the nearest 0.001 in. for both specimens.

8.5.2 Standard Round Tension Test Specimens—These forms of specimens are shown in Fig. 4 and Fig. 5. To determine the cross-sectional area, the diameter shall be measured at the center of the gage length to the nearest 0.001 in. (0.025 mm). (See Table 1.)

8.6 General—Test specimens shall be either substantially

 A 370

full size or machined, as prescribed in the product specifications for the material being tested.

8.6.1 Improperly prepared test specimens often cause unsatisfactory test results. It is important, therefore, that care be exercised in the preparation of specimens, particularly in the machining, to assure good workmanship.

8.6.2 It is desirable to have the cross-sectional area of the specimen smallest at the center of the gage length to ensure fracture within the gage length. This is provided for by the taper in the gage length permitted for each of the specimens described in the following sections.

8.6.3 For brittle materials it is desirable to have fillets of large radius at the ends of the gage length.

9. Plate-Type Specimen

9.1 The standard plate-type test specimen is shown in Fig. 3. This specimen is used for testing metallic materials in the form of plate, structural and bar-size shapes, and flat material having a nominal thickness of $\frac{3}{16}$ in. (5 mm) or over. When product specifications so permit, other types of specimens may be used.

Note 3—When called for in the product specification, the 8-in. gage length specimen of Fig. 3 may be used for sheet and strip material.

10. Sheet-Type Specimen

10.1 The standard sheet-type test specimen is shown in Fig. 3. This specimen is used for testing metallic materials in the form of sheet, plate, flat wire, strip, band, and hoop ranging in nominal thickness from 0.005 to $\frac{3}{16}$ in. (0.13 to 19 mm). When product specifications so permit, other types of specimens may be used, as provided in Section 9 (see Note 3).

11. Round Specimens

11.1 The standard 0.500-in. (12.5-mm) diameter round test specimen shown in Fig. 4 is used quite generally for testing metallic materials, both cast and wrought.

11.2 Fig. 4 also shows small size specimens proportional to the standard specimen. These may be used when it is necessary to test material from which the standard specimen or specimens shown in Fig. 3 cannot be prepared. Other sizes of small round specimens may be used. In any such small size specimen it is important that the gage length for measurement of elongation be four times the diameter of the specimen (see Note 4, Fig. 4).

11.3 The shape of the ends of the specimens outside of the gage length shall be suitable to the material and of a shape to fit the holders or grips of the testing machine so that the loads are applied axially. Fig. 5 shows specimens with various types of ends that have given satisfactory results.

12. Gage Marks

12.1 The specimens shown in Figs. 3-6 shall be gage marked with a center punch, scribe marks, multiple device, or drawn with ink. The purpose of these gage marks is to determine the percent elongation. Punch marks shall be light, sharp, and accurately spaced. The localization of stress at the marks makes a hard specimen susceptible to starting fracture at the punch marks. The gage marks for measuring elongation after fracture shall be made on the flat or on the edge of the flat tension test specimen and within the parallel section; for the 8-in. gage length specimen, Fig. 3, one or more sets of 8-in.

gage marks may be used, intermediate marks within the gage length being optional. Rectangular 2-in. gage length specimens, Fig. 3, and round specimens, Fig. 4, are gage marked with a double-pointed center punch or scribe marks. One or more sets of gage marks may be used, however, one set may be approximately centered in the reduced section. These same precautions shall be observed when the test specimen is fractured.

13. Determination of Tensile Properties

13.1 *Yield Point*—Yield point is the first stress in a material less than the maximum obtainable stress, at which an increase in strain occurs without an increase in stress. Yield point is intended for application only for materials that may exhibit the unique characteristic of showing an increase in strain without an increase in stress. The stress-strain diagram is characterized by a sharp knee or discontinuity. Determine yield point by one of the following methods:

13.1.1 *Drop of the Beam or Halt of the Pointer Method*—This method apply an increasing load to the specimen at uniform rate. When a lever and poise machine is used, keep the beam in balance by running out the poise at approximately steady rate. When the yield point of the material is reached, the increase of the load will stop, but run the poise a trifle beyond the balance position, and the beam of the machine will drop in a brief but appreciable interval of time. When a machine equipped with a load-indicating dial is used there is a hesitation of the load-indicating pointer corresponding to the drop of the beam. Note the load at the "drop of the beam" the "halt of the pointer" and record the corresponding stress as the yield point.

13.1.2 *Autographic Diagram Method*—When a sharp knee stress-strain diagram is obtained by an autographic recording device, take the stress corresponding to the top of the knee (Fig. 7), or the stress at which the curve drops as the yield point.

13.1.3 *Total Extension Under Load Method*—When testing material for yield point and the test specimens may not exhibit a well-defined disproportionate deformation that characterizes a yield point as measured by the drop of the beam, halt of the pointer, or autographic diagram methods described in 13.1.1 and 13.1.2, a value equivalent to the yield point in its practical significance may be determined by the following method and may be recorded as yield point: Attach a Class C or better extensometer (Note 4 and Note 5) to the specimen. When the load producing a specified extension (Note 6) is reached record the stress corresponding to the load as the yield point (Fig. 8).

Note 4—Automatic devices are available that determine the load at specified total extension without plotting a stress-strain curve. Such devices may be used if their accuracy has been demonstrated. Multiple calipers and other such devices are acceptable for use provided their accuracy has been demonstrated as equivalent to a Class C extensometer.

Note 5—Reference should be made to Practice E 83.

Note 6—For steel with a yield point specified not over 80 000 psi (550 MPa), an appropriate value is 0.005 in./in. of gage length. For values above 80 000 psi, this method is not valid unless the limiting total extension is increased.

Note 7—The shape of the initial portion of an autographically determined stress-strain (or a load-elongation) curve may be influenced by numerous factors such as the seating of the specimen in the grips.

A 370

straightening of a specimen bent due to residual stresses, and the rapid loading permitted in 7.4.1. Generally, the aberrations in this portion of the curve should be ignored when fitting a modulus line, such as that used to determine the extension-under-load yield, to the curve.

13.2 Yield Strength—Yield strength is the stress at which a material exhibits a specified limiting deviation from the proportionality of stress to strain. The deviation is expressed in terms of strain, percent offset, total extension under load, etc. Determine yield strength by one of the following methods:

13.2.1 Offset Method—To determine the yield strength by the "offset method," it is necessary to secure data (autographic or numerical) from which a stress-strain diagram may be drawn. Then on the stress-strain diagram (Fig. 9) lay off Om equal to the specified value of the offset, draw mn parallel to OA , and thus locate r , the intersection of mn with the stress-strain curve corresponding to load R which is the yield-strength load. In recording values of yield strength obtained by this method, the value of offset specified or used, or both, shall be stated in parentheses after the term yield strength, for example:

$$\text{Yield strength (0.2 \% offset)} = 52\,000 \text{ psi (360 MPa)} \quad (1)$$

When the offset is 0.2 % or larger, the extensometer used shall qualify as a Class B2 device over a strain range of 0.05 to 1.0 %. If a smaller offset is specified, it may be necessary to specify a more accurate device (that is, a Class B1 device) or reduce the lower limit of the strain range (for example, to 0.01 %) or both. See also Note 8 for automatic devices.

13.2.2 Extension Under Load Method—For tests to determine the acceptance or rejection of material whose stress-strain characteristics are well known from previous tests of similar material in which stress-strain diagrams were plotted, the total strain corresponding to the stress at which the specified offset (see Note 8 and Note 9) occurs will be known within satisfactory limits. The stress on the specimen, when this total strain is reached, is the value of the yield strength. In recording values of yield strength obtained by this method, the value of extension" specified or used, or both, shall be stated in parentheses after the term yield strength, for example:

$$\text{Yield strength (0.5 \% EUL)} = 52\,000 \text{ psi (360 MPa)} \quad (2)$$

The total strain can be obtained satisfactorily by use of a Class B1 extensometer (Note 4, Note 5, and Note 7).

Note 8—Automatic devices are available that determine offset yield strength without plotting a stress-strain curve. Such devices may be used their accuracy has been demonstrated.

Note 9—The appropriate magnitude of the extension under load will vary with the strength range of the particular steel under test. In general, the value of extension under load applicable to steel at any strength level may be determined from the sum of the proportional strain and the plastic strain expected at the specified yield strength. The following equation is used:

$$\text{Extension under load, in/in. of gage length} = (YSE) + \epsilon \quad (3)$$

where:

- S = specified yield strength, psi or MPa,
- E = modulus of elasticity, psi or MPa, and
- ϵ = limiting plastic strain, in/in.

13.3 Tensile Strength—Calculate the tensile strength by dividing the maximum load the specimen sustains during a

tension test by the original cross-sectional area of the specimen.

13.4 Elongation:

13.4.1 Fit the ends of the fractured specimen together carefully and measure the distance between the gage marks to the nearest 0.01 in. (0.25 mm) for gage lengths of 2 in. and under, and to the nearest 0.5 % of the gage length for gage lengths over 2 in. A percentage scale reading to 0.5 % of the gage length may be used. The elongation is the increase in length of the gage length, expressed as a percentage of the original gage length. In recording elongation values, give both the percentage increase and the original gage length.

13.4.2 If any part of the fracture takes place outside of the middle half of the gage length or in a punched or scribed mark within the reduced section, the elongation value obtained may not be representative of the material. If the elongation so measured meets the minimum requirements specified, no further testing is indicated, but if the elongation is less than the minimum requirements, discard the test and retest.

13.5 Reduction of Area—Fit the ends of the fractured specimen together and measure the mean diameter or the width and thickness at the smallest cross section to the same accuracy as the original dimensions. The difference between the area thus found and the area of the original cross section expressed as a percentage of the original area, is the reduction of area.

BEND TEST

14. Description

14.1 The bend test is one method for evaluating ductility, but it cannot be considered as a quantitative means of predicting service performance in bending operations. The severity of the bend test is primarily a function of the angle of bend and inside diameter to which the specimen is bent, and of the cross section of the specimen. These conditions are varied according to location and orientation of the test specimen and the chemical composition, tensile properties, hardness, type, and quality of the steel specified. Method E 190 and Test Method E 290 may be consulted for methods of performing the test.

14.2 Unless otherwise specified, it shall be permissible to age bend test specimens. The time-temperature cycle employed must be such that the effects of previous processing will not be materially changed. It may be accomplished by aging at room temperature 24 to 48 h, or in shorter time at moderately elevated temperatures by boiling in water, heating in oil, or in an oven.

14.3 Bend the test specimen at room temperature to an inside diameter, as designated by the applicable product specifications, to the extent specified without major cracking on the outside of the bent portion. The speed of bending is ordinarily not an important factor.

HARDNESS TEST

15. General

15.1 A hardness test is a means of determining resistance to penetration and is occasionally employed to obtain a quick approximation of tensile strength. Table 2, Table 3, Table 4, and Table 5 are for the conversion of hardness measurements

A 370

from one scale to another or to approximate tensile strength. These conversion values have been obtained from computer-generated curves and are presented to the nearest 0.1 point to permit accurate reproduction of those curves. Since all converted hardness values must be considered approximate, however, all converted Rockwell hardness numbers shall be rounded to the nearest whole number.

15.2 Hardness Testing:

15.2.1 If the product specification permits alternative hardness testing to determine conformance to a specified hardness requirement, the conversions listed in Table 2, Table 3, Table 4, and Table 5 shall be used.

15.2.2 When recording converted hardness numbers, the measured hardness and test scale shall be indicated in parentheses, for example: 353 HB (38 HRC). This means that a hardness value of 38 was obtained using the Rockwell C scale and converted to a Brinell hardness of 353.

16. Brinell Test

16.1 Description:

16.1.1 A specified load is applied to a flat surface of the specimen to be tested, through a hard ball of specified diameter. The average diameter of the indentation is used as a basis for calculation of the Brinell hardness number. The quotient of the applied load divided by the area of the surface of the indentation, which is assumed to be spherical, is termed the Brinell hardness number (HB) in accordance with the following equation:

$$HB = \frac{P}{\pi D^2} \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right) \quad (4)$$

where:

HB = Brinell hardness number,

P = applied load, kgf,

D = diameter of the steel ball, mm, and

d = average diameter of the indentation, mm.

Note 10—The Brinell hardness number is more conveniently secured from standard tables such as Table 6 which show numbers corresponding to the various indentation diameters, usually in increments of 0.05 mm.

Note 11—In Test Method E10, the values are stated in SI unit whereas in this section, kg/m units are used.

16.1.2 The standard Brinell test using a 10-mm ball employs a 3000-kgf load for hard materials and a 1500 or 500-kg load for thin sections or soft materials (see Annex on Steel Tubular Products). Other loads and different size indentors may be used when specified. In recording hardness values, the diameter of the ball and the load must be stated except when a 10-mm ball and 3000-kgf load are used.

16.1.3 A range of hardness can properly be specified only for quenched and tempered or normalized and tempered material. For annealed material a maximum figure only should be specified. For normalized material a minimum or a maximum hardness may be specified by agreement. In general, no hardness requirements should be applied to untreated material.

16.1.4 Brinell hardness may be required when tensile properties are not specified.

16.2 Apparatus—Equipment shall meet the following requirements:

16.2.1 Testing Machine—A Brinell hardness testing machine is acceptable for use over a loading range within which its load measuring device is accurate to $\pm 1\%$.

16.2.2 Measuring Microscope—The divisions of the micrometer scale of the microscope or other measuring devices used for the measurement of the diameter of the indentations shall be such as to permit the direct measurement of the diameter to 0.1 mm and the estimation of the diameter to 0.05 mm.

Note 12—This requirement applies to the construction of the microscope only and is not a requirement for measurement of the indentation, see 16.4.3.

16.2.3 Standard Ball—The standard ball for Brinell hardness testing is 10 mm (0.3937 in.) in diameter with a deviation from this value of not more than 0.005 mm (0.0004 in.) in any diameter. A ball suitable for use must not show a permanent change in diameter greater than 0.01 mm (0.0004 in.) when pressed with a force of 3000 kgf against the test specimen.

 A 370

16.3 Test Specimen—Brinell hardness tests are made on prepared areas and sufficient metal must be removed from the surface to eliminate decarburized metal and other surface irregularities. The thickness of the piece tested must be such that no bulge or other marking showing the effect of the load appears on the side of the piece opposite the indentation.

16.4 Procedure:

16.4.1 It is essential that the applicable product specifications state clearly the position at which Brinell hardness indentations are to be made and the number of such indentations required. The distance of the center of the indentation from the edge of the specimen or edge of another indentation must be at least two and one-half times the diameter of the indentation.

16.4.2 Apply the load for a minimum of 15 s.

16.4.3 Measure two diameters of the indentation at right angles to the nearest 0.1 mm, estimate to the nearest 0.05 mm, and average to the nearest 0.05 mm. If the two diameters differ by more than 0.1 mm, discard the readings and make a new indentation.

16.4.4 Do not use a steel ball on steels having a hardness over 450 HB nor a carbide ball on steels having a hardness over 650 HB. The Brinell hardness test is not recommended for materials having a hardness over 650 HB.

16.4.4.1 If a ball is used in a test of a specimen which shows a Brinell hardness number greater than the limit for the ball as detailed in 16.4.4, the ball shall be either discarded and replaced with a new ball or remeasured to ensure conformance with the requirements of Test Method E 10.

16.5 Detailed Procedure—For detailed requirements of this test, reference shall be made to the latest revision of Test Method E 10.

17. Rockwell Test**17.1 Description:**

17.1.1 In this test a hardness value is obtained by determining the depth of penetration of a diamond point or a steel ball into the specimen under certain arbitrarily fixed conditions. A minor load of 10 kgf is first applied which causes an initial penetration, sets the penetrator on the material and holds it in position. A major load which depends on the scale being used is applied increasing the depth of indentation. The major load is removed and, with the minor load still acting, the Rockwell number, which is proportional to the difference in penetration between the major and minor loads is determined; this is usually done by the machine and shows on a dial, digital display, printer, or other device. This is an arbitrary number which increases with increasing hardness. The scales most frequently used are as follows:

Scale Symbol	Penetrator	Major Load, kgf	Minor Load, kgf
B	1/16-in. steel ball	100	10
C	Diamond brale	150	10

17.1.2 Rockwell superficial hardness machines are used for the testing of very thin steel or thin surface layers. Loads of 15, 30, or 45 kgf are applied on a hardened steel ball or diamond penetrator, to cover the same range of hardness values as for

the heavier loads. The superficial hardness scales are as follows:

Scale Symbol	Penetrator	Major Load, kgf	Minor Load, kgf
15T	1/16-in. steel ball	15	3
30T	1/16-in. steel ball	30	3
45T	1/16-in. steel ball	45	3
15N	Diamond brale	15	3
30N	Diamond brale	30	3
45N	Diamond brale	45	3

17.2 Reporting Hardness—In recording hardness values, the hardness number shall always precede the scale symbol, for example: 96 HRB, 40 HRC, 75 HR15N, or 77 HR30T.

17.3 Test Blocks—Machines should be checked to make certain they are in good order by means of standardized Rockwell test blocks.

17.4 Detailed Procedure—For detailed requirements of this test, reference shall be made to the latest revision of Test Methods E 18.

18. Portable Hardness Test

18.1 Although the use of the standard, stationary Brinell or Rockwell hardness tester is generally preferred, it is not always possible to perform the hardness test using such equipment due to the part size or location. In this event, hardness testing using portable equipment as described in Practice A 833 or Test Method E 110 shall be used.

CHARPY IMPACT TESTING**19. Summary**

19.1 A Charpy V-notch impact test is a dynamic test in which a notched specimen is struck and broken by a single blow in a specially designed testing machine. The measured test values may be the energy absorbed, the percentage shear fracture, the lateral expansion opposite the notch, or a combination thereof.

19.2 Testing temperatures other than room (ambient) temperature often are specified in product or general requirement specifications (hereinafter referred to as the specification). Although the testing temperature is sometimes related to the expected service temperature, the two temperatures need not be identical.

20. Significance and Use

20.1 Ductile vs. Brittle Behavior—Body-centered-cubic or ferritic alloys exhibit a significant transition in behavior when impact tested over a range of temperatures. At temperatures above transition, impact specimens fracture by a ductile (usually microvoid coalescence) mechanism, absorbing relatively large amounts of energy. At lower temperatures, they fracture in a brittle (usually cleavage) manner absorbing less energy. Within the transition range, the fracture will generally be a mixture of areas of ductile fracture and brittle fracture.

20.2 The temperature range of the transition from one type of behavior to the other varies according to the material being tested. This transition behavior may be defined in various ways for specification purposes.

20.2.1 The specification may require a minimum test result for absorbed energy, fracture appearance, lateral expansion, or

A 370

a combination thereof, at a specified test temperature.

20.2.2 The specification may require the determination of the transition temperature at which either the absorbed energy or fracture appearance attains a specified level when testing is performed over a range of temperatures.

20.3 Further information on the significance of impact testing appears in Annex A5.

21. Apparatus

21.1 Testing Machines:

21.1.1 A Charpy impact machine is one in which a notched specimen is broken by a single blow of a freely swinging pendulum. The pendulum is released from a fixed height. Since the height to which the pendulum is raised prior to its swing, and the mass of the pendulum are known, the energy of the blow is predetermined. A means is provided to indicate the energy absorbed in breaking the specimen.

21.1.2 The other principal feature of the machine is a fixture (See Fig. 10) designed to support a test specimen as a simple beam at a precise location. The fixture is arranged so that the notched face of the specimen is vertical. The pendulum strikes the other vertical face directly opposite the notch. The dimensions of the specimen supports and striking edge shall conform to Fig. 10.

21.1.3 Charpy machines used for testing steel generally have capacities in the 220 to 300 ft-lbf (300 to 400 J) energy range. Sometimes machines of lesser capacity are used; however, the capacity of the machine should be substantially in excess of the absorbed energy of the specimens (see Test Methods E 23). The linear velocity at the point of impact should be in the range of 16 to 19 ft/s (4.9 to 5.8 m/s).

21.2 Temperature Media:

21.2.1 For testing at other than room temperature, it is necessary to condition the Charpy specimens in media at controlled temperatures.

21.2.2 Low temperature media usually are chilled fluids (such as water, ice plus water, dry ice plus organic solvents, or liquid nitrogen) or chilled gases.

21.2.3 Elevated temperature media are usually heated liquids such as mineral or silicone oils. Circulating air ovens may be used.

21.3 *Handling Equipment*—Tongs, especially adapted to fit the notch in the impact specimen, normally are used for removing the specimens from the medium and placing them on the anvil (refer to Test Methods E 23). In cases where the machine fixture does not provide for automatic centering of the test specimen, the tongs may be precision machined to provide centering.

22. Sampling and Number of Specimens

22.1 Sampling:

22.1.1 Test location and orientation should be addressed by the specifications. If not, for wrought products, the test location shall be the same as that for the tensile specimen and the orientation shall be longitudinal with the notch perpendicular to the major surface of the product being tested.

22.1.2 Number of Specimens.

22.1.2.1 A Charpy impact test consists of all specimens taken from a single test coupon or test location.

22.1.2.2 When the specification calls for a minimum average test result, three specimens shall be tested.

22.1.2.3 When the specification requires determination of transition temperature, eight to twelve specimens are usually needed.

22.2 Type and Size:

22.2.1 Use a standard full size Charpy V-notch specimen (Type A) as shown in Fig. 11, except as allowed in 22.2.2.

22.2.2 Subsize Specimens.

22.2.2.1 For flat material less than $\frac{1}{16}$ in. (11 mm) thick, or when the absorbed energy is expected to exceed 80 % of full scale, use standard subsize test specimens.

22.2.2.2 For tubular materials tested in the transverse direction, where the relationship between diameter and wall thickness does not permit a standard full size specimen, use standard subsize test specimens or standard size specimens containing outer diameter (OD) curvature as follows:

(1) Standard size specimens and subsize specimens may contain the original OD surface of the tubular product as shown in Fig. 12. All other dimensions shall comply with the requirements of Fig. 11.

Note 13—For materials with toughness levels in excess of about 5 ft-lbs, specimens containing the original OD surface may yield values in excess of those resulting from the use of conventional Charpy specimens.

22.2.2.3 If a standard full-size specimen cannot be prepared the largest feasible standard subsize specimen shall be prepared. The specimens shall be machined so that the specimen does not include material nearer to the surface than 0.020 in. (0.5 mm).

22.2.2.4 Tolerances for standard subsize specimens are shown in Fig. 11. Standard subsize test specimen sizes are 10 × 7.5 mm, 10 × 6.7 mm, 10 × 5 mm, 10 × 3.3 mm, and 10 × 2.5 mm.

22.2.2.5 Notch the narrow face of the standard subsize specimens so that the notch is perpendicular to the 10 mm wide face.

22.3 *Notch Preparation*—The machining of the notch is critical, as it has been demonstrated that extremely minor variations in notch radius and profile, or tool marks at the bottom of the notch may result in erratic test data. (See Annex A5).

23. Calibration

23.1 *Accuracy and Sensitivity*—Calibrate and adjust Charpy impact machines in accordance with the requirements of Test Methods E 23.

24. Conditioning—Temperature Control

24.1 When a specific test temperature is required by the specification or purchaser, control the temperature of the heating or cooling medium within $\pm 2^\circ\text{F}$ (1°C) because the effect of variations in temperature on Charpy test results can be very great.

Note 14—For some steels there may not be a need for test temperature, for example, austenitic steels.

Note 15—Because the temperature of a testing laboratory often varies from 60 to 90°F (15 to 32°C) a test conducted at "room temperature" might be conducted at any temperature in this range.

A 370

25. Procedure

25.1 Temperature:

25.1.1 Condition the specimens to be broken by holding them in the medium at test temperature for at least 5 min in liquid media and 30 min in gaseous media.

25.1.2 Prior to each test, maintain the tongs for handling test specimens at the same temperature as the specimen so as not to affect the temperature at the notch.

25.2 Positioning and Breaking Specimens:

25.2.1 Carefully center the test specimen in the anvil and release the pendulum to break the specimen.

25.2.2 If the pendulum is not released within 5 s after removing the specimen from the conditioning medium, do not break the specimen. Return the specimen to the conditioning medium for the period required in 25.1.1.

25.3 Recovering Specimens—In the event that fracture appearance or lateral expansion must be determined, recover the matched pieces of each broken specimen before breaking the next specimen.

25.4 Individual Test Values:

25.4.1 Impact energy—Record the impact energy absorbed to the nearest ft-lbf (J).

25.4.2 Fracture Appearance:

25.4.2.1 Determine the percentage of shear fracture area by any of the following methods:

(1) Measure the length and width of the brittle portion of the fracture surface, as shown in Fig. 13 and determine the percent shear area from either Table 7 or Table 8 depending on the units of measurement.

(2) Compare the appearance of the fracture of the specimen with a fracture appearance chart as shown in Fig. 14.

(3) Magnify the fracture surface and compare it to a precalibrated overlay chart or measure the percent shear fracture area by means of a planimeter.

(4) Photograph the fractured surface at a suitable magnification and measure the percent shear fracture area by means of a planimeter.

25.4.2.2 Determine the individual fracture appearance values to the nearest 5% shear fracture and record the value.

25.4.3 Lateral Expansion:

25.4.3.1 Lateral expansion is the increase in specimen width, measured in thousandths of an inch (mils), on the compression side, opposite the notch of the fractured Charpy V-notch specimen as shown in Fig. 15.

25.4.3.2 Examine each specimen half to ascertain that the protrusions have not been damaged by contacting the anvil, machine mounting surface, and so forth. Discard such samples since they may cause erroneous readings.

25.4.3.3 Check the sides of the specimens perpendicular to the notch to ensure that no burrs were formed on the sides during impact testing. If burrs exist, remove them carefully by rubbing on emery cloth or similar abrasive surface, making sure that the protrusions being measured are not rubbed during the removal of the burr.

25.4.3.4 Measure the amount of expansion on each side of each half relative to the plane defined by the undeformed portion of the side of the specimen using a gage similar to that shown in Fig. 16 and Fig. 17.

25.4.3.5 Since the fracture path seldom bisects the point of maximum expansion on both sides of a specimen, the sum of the larger values measured for each side is the value of the test. Arrange the halves of one specimen so that compression sides are facing each other. Using the gage, measure the protrusion on each half specimen, ensuring that the same side of the specimen is measured. Measure the two broken halves individually. Repeat the procedure to measure the protrusions on the opposite side of the specimen halves. The larger of the two values for each side is the expansion of that side of the specimen.

25.4.3.6 Measure the individual lateral expansion values to the nearest mil (0.025 mm) and record the values.

26. Interpretation of Test Result

26.1 When the acceptance criterion of any impact test is specified to be a minimum average value at a given temperature, the test result shall be the average (arithmetic mean) of the individual test values of three specimens from one test location.

26.1.1 When a minimum average test result is specified:

26.1.1.1 The test result is acceptable when all of the below are met:

(1) The test result equals or exceeds the specified minimum average (given in the specification),

(2) The individual test value for not more than one specimen measures less than the specified minimum average, and

(3) The individual test value for any specimen measures not less than two-thirds of the specified minimum average.

26.1.1.2 If the acceptance requirements of 26.1.1.1 are not met, perform one retest of three additional specimens from the same test location. Each individual test value of the retested specimens shall be equal to or greater than the specified minimum average value.

26.2 Test Specifying a Minimum Transition Temperature:

26.2.1 Definition of Transition Temperature—For specification purposes, the transition temperature is the temperature at which the designated material test value equals or exceeds a specified minimum test value.

26.2.2 Determination of Transition Temperature:

26.2.2.1 Break one specimen at each of a series of temperatures above and below the anticipated transition temperature using the procedures in Section 25. Record each test temperature to the nearest 1°F (0.5°C).

26.2.2.2 Plot the individual test results (ft-lbf or percent shear) as the ordinate versus the corresponding test temperature as the abscissa and construct a best-fit curve through the plotted data points.

26.2.2.3 If transition temperature is specified as the temperature at which a test value is achieved, determine the temperature at which the plotted curve intersects the specified test value by graphical interpolation (extrapolation is not permitted). Record this transition temperature to the nearest 5°F (3°C). If the tabulated test results clearly indicate a transition temperature lower than specified, it is not necessary to plot the data. Report the lowest test temperature for which test value exceeds the specified value.

26.2.2.4 Accept the test result if the determined transition temperature is equal to or lower than the specified value.

 A 370

26.2.2.5 If the determined transition temperature is higher than the specified value, but not more than 20°F (12°C) higher than the specified value, test sufficient samples in accordance with Section 25 to plot two additional curves. Accept the test results if the temperatures determined from both additional tests are equal to or lower than the specified value.

26.3 When subsize specimens are permitted or necessary, or both, modify the specified test requirement according to Table 9 or test temperature according to ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Table UG-84.2, or both. Greater energies or lower test temperatures may be agreed upon by purchaser and supplier.

27. Records

27.1 The test record should contain the following information as appropriate:

27.1.1 Full description of material tested (that is, specification number, grade, class or type, size, heat number).

27.1.2 Specimen orientation with respect to the material axis.

27.1.3 Specimen size.

27.1.4 Test temperature and individual test value for each specimen broken, including initial tests and retests.

27.1.5 Test results.

27.1.6 Transition temperature and criterion for its determination, including initial tests and retests.

28. Report

28.1 The specification should designate the information to be reported.

29. Keywords

29.1 bend test; Brinell hardness; Charpy impact test; elongation; FATT (Fracture Appearance Transition Temperature); hardness test; portable hardness; reduction of area; Rockwell hardness; tensile strength; tension test; yield strength

ANNEXES

(Mandatory Information)

A1. STEEL BAR PRODUCTS

A1.1 Scope

A1.1.1 This supplement delineates only those details which are peculiar to hot-rolled and cold-finished steel bars and are not covered in the general section of these test methods.

A1.2 Orientation of Test Specimens

A1.2.1 Carbon and alloy steel bars and bar-size shapes, due to their relatively small cross-sectional dimensions, are customarily tested in the longitudinal direction. In special cases where size permits and the fabrication or service of a part justifies testing in a transverse direction, the selection and location of test or tests are a matter of agreement between the manufacturer and the purchaser.

A1.3 Tension Test

A1.3.1 *Carbon Steel Bars*—Carbon steel bars are not commonly specified to tensile requirements in the as-rolled condition for sizes of rounds, squares, hexagons, and octagons under ½ in. (13 mm) in diameter or distance between parallel faces

nor for other bar-size sections, other than flats, less than 1 in.² (645 mm²) in cross-sectional area.

A1.3.2 *Alloy Steel Bars*—Alloy steel bars are usually not tested in the as-rolled condition.

A1.3.3 When tension tests are specified, the practice for selecting test specimens for hot-rolled and cold-finished steel bars of various sizes shall be in accordance with Table A1.1, unless otherwise specified in the product specification.

A1.4 Bend Test

A1.4.1 When bend tests are specified, the recommended practice for hot-rolled and cold-finished steel bars shall be in accordance with Table A1.2.

A1.5 Hardness Test

A1.5.1 *Hardness Tests on Bar Products*—Tests on rounds, squares, hexagons and octagons—is conducted on the surface after a minimum removal of 0.015 in. to provide for accurate hardness penetration.

A2. STEEL TUBULAR PRODUCTS

A2.1 Scope

A2.1.1 This supplement covers definitions and methods of testing peculiar to tubular products which are not covered in the general section of these methods.

A2.1.2 Tubular shapes covered by this specification shall not be limited to products with circular cross sections but include shapes such as rectangular structural tubing.

A2.2 Tension Test

A2.2.1 Full-Size Longitudinal Test Specimens

A2.2.1.1 It is standard practice to use longitudinal specimens of full-size tubular sections when the wall is not thick enough to permit the use of standard testing equipment. Snug-fitting metal plugs should be inserted far enough in the end of such tubular specimens to permit the testing machine jaws to grip the specimens firmly without

A 370

crushing. A design that may be used for such plugs is shown in Fig. A2.1. The plugs shall not extend into that part of the specimen on which the elongation is measured (Fig. A2.1). Care should be exercised to see that insofar as practicable, the load in such cases is applied axially. The length of the full-section specimen depends on the gage length prescribed for measuring the elongation.

A2.2.1.2 Unless otherwise required by the individual product specification, the gage length for furnace-welded pipe is normally 8 in. (200 mm), except that for nominal sizes $\frac{1}{4}$ in. and smaller, the gage length shall be as follows:

Nominal Size, in.	Gage Length, in. (mm)
$\frac{1}{4}$ and $\frac{1}{2}$	6 (150)
$\frac{3}{8}$ and $\frac{1}{2}$	4 (100)
$\frac{1}{4}$	2 (50)

A2.2.1.3 For seamless and electric-welded pipe and tubes the gage length is 2 in. However, for tubing having an outside diameter of $\frac{1}{4}$ in. (10 mm) or less, it is customary to use a gage length equal to four times the outside diameter when elongation values comparable to larger specimens are required.

A2.2.1.4 To determine the cross-sectional area of the full-section specimen, measurements shall be recorded as the average or mean between the greatest and least measurements of the outside diameter and the average or mean wall thickness, to the nearest 0.001 in. (0.025 mm) and the cross-sectional area is determined by the following equation:

$$A = 3.1416(D - t) \quad (A2.1)$$

where:

A = sectional area, in.²

D = outside diameter, in., and

t = thickness of tube wall, in.

Note A2.1—There exist other methods of cross-sectional area determination, such as by weighing of the specimens, which are equally accurate or appropriate for the purpose.

A2.2.2 Longitudinal Strip Test Specimens:

A2.2.2.1 For larger sizes of tubular products which cannot be tested in full-section, longitudinal test specimens are obtained from strips cut from the tube or pipe as indicated in Fig. A2.2 and machined to the dimensions shown in Fig. A2.3. For furnace-welded tubes or pipe the 8-in. gage length specimen as shown in Fig. A2.3 is standard, the specimen being located at approximately 90° from the weld. For seamless and electric-welded tubes or pipe, the 2-in. gage length specimen as shown in Fig. A2.3 (1) is standard, the specimen being located approximately 90° from the weld in the case of electric-welded tubes. Specimens of the type shown in Fig. A2.3 may be tested with grips having a surface contour corresponding to the curvature of the tubes. When grips with curved faces are not available, the ends of the specimens may be flattened without heating. Standard tension test specimens, as shown in specimen No. 4 of Fig. A2.3, are nominally $1\frac{1}{2}$ in. (38 mm) wide in the gage length section. When sub-size specimens are necessary due to the dimensions and character of the material to be tested, specimens 1, 2, or 3 shown in Fig. A2.3 where applicable, are considered standard.

Note A2.2—An exact formula for calculating the cross-sectional area of specimens of the type shown in Fig. A2.3 taken from a circular tube is

given in Test Methods E 8 or E 8M.

A2.2.2.2 The width should be measured at each end of the gage length to determine parallelism and also at the center. The thickness should be measured at the center and used with the center measurement of the width to determine the cross-sectional area. The center width dimension should be recorded to the nearest 0.005 in. (0.127 mm), and the thickness measurement to the nearest 0.001 in.

A2.2.3 Transverse Strip Test Specimens:

A2.2.3.1 In general, transverse tension tests are not recommended for tubular products, in sizes smaller than 8 in. in nominal diameter. When required, transverse tension test specimens may be taken from rings cut from ends of tubes or pipe as shown in Fig. A2.4. Flattening of the specimen may be done either after separating it from the tube as in Fig. A2.4 (a), or before separating it as in Fig. A2.4 (b), and may be done hot or cold; but if the flattening is done cold, the specimen may subsequently be normalized. Specimens from tubes or pipe for which heat treatment is specified, after being flattened either hot or cold, shall be given the same treatment as the tubes or pipe. For tubes or pipe having a wall thickness of less than $\frac{1}{4}$ in. (19 mm), the transverse test specimen shall be of the form and dimensions shown in Fig. A2.5 and either or both surfaces may be machined to secure uniform thickness. Specimens for transverse tension tests on welded steel tubes or pipe to determine strength of welds, shall be located perpendicular to the welded seams with the weld at about the middle of their length.

A2.2.3.2 The width should be measured at each end of the gage length to determine parallelism and also at the center. The thickness should be measured at the center and used with the center measurement of the width to determine the cross-sectional area. The center width dimension should be recorded to the nearest 0.005 in. (0.127 mm), and the thickness measurement to the nearest 0.001 in. (0.025 mm).

A2.2.4 Round Test Specimens:

A2.2.4.1 When provided for in the product specification, the round test specimen shown in Fig. 4 may be used.

A2.2.4.2 The diameter of the round test specimen is measured at the center of the specimen to the nearest 0.001 in. (0.025 mm).

A2.2.4.3 Small-size specimens proportional to standard, as shown in Fig. 4, may be used when it is necessary to test material from which the standard specimen cannot be prepared. Other sizes of small-size specimens may be used. In any such small-size specimen, it is important that the gage length for measurement of elongation be four times the diameter of the specimen (see Note 4, Fig. 4). The elongation requirements for the round specimen 2-in. gage length in the product specification shall apply to the small-size specimens.

A2.2.4.4 For transverse specimens, the section from which the specimen is taken shall not be flattened or otherwise deformed.

A2.3 Determination of Transverse Yield Strength, Hydraulic Ring-Expansion Method

A2.3.1 Hardness tests are made on the outside surface, inside surface, or wall cross-section depending upon product-specification limitation. Surface preparation may be necessary

A 370

to obtain accurate hardness values.

A2.3.2 A testing machine and method for determining the transverse yield strength from an annular ring specimen, have been developed and described in A2.3.3 through A2.3.5.

A2.3.3 A diagrammatic vertical cross-sectional sketch of the testing machine is shown in Fig. A2.6.

A2.3.4 In determining the transverse yield strength on this machine, a short ring (commonly 3 in. (76 mm) in length) test specimen is used. After the large circular nut is removed from the machine, the wall thickness of the ring specimen is determined and the specimen is telescoped over the oil resistant rubber gasket. The nut is then replaced, but is not turned down tight against the specimen. A slight clearance is left between the nut and specimen for the purpose of permitting free radial movement of the specimen as it is being tested. Oil under pressure is then admitted to the interior of the rubber gasket through the pressure line under the control of a suitable valve. An accurately calibrated pressure gage serves to measure oil pressure. Any air in the system is removed through the bleeder line. As the oil pressure is increased, the rubber gasket expands which in turn stresses the specimen circumferentially. As the pressure builds up, the lips of the rubber gasket act as a seal to prevent oil leakage. With continued increase in pressure, the ring specimen is subjected to a tension stress and elongates accordingly. The entire outside circumference of the ring specimen is considered as the gage length and the strain is measured with a suitable extensometer which will be described later. When the desired total strain or extension under load is reached on the extensometer, the oil pressure in pounds per square inch is read and by employing Barlow's formula, the unit yield strength is calculated. The yield strength, thus determined, is a true result since the test specimen has not been cold worked by flattening and closely approximates the same condition as the tubular section from which it is cut. Further, the test closely simulates service conditions in pipe lines. One testing machine unit may be used for several different sizes of pipe by the use of suitable rubber gaskets and adapters.

Note A2.3—Barlow's formula may be stated two ways:

$$(1) P = 2St/D \quad (A2.2)$$

$$(2) S = PD/2t \quad (A2.3)$$

where:

P = internal hydrostatic pressure, psi,

S = unit circumferential stress in the wall of the tube produced by the internal hydrostatic pressure, psi,

t = thickness of the tube wall, in., and

D = outside diameter of the tube, in.

A2.3.5 A roller chain type extensometer which has been found satisfactory for measuring the elongation of the ring specimen is shown in Fig. A2.7 and Fig. A2.8. Fig. A2.7 shows the extensometer in position, but unclamped, on a ring specimen. A small pin, through which the strain is transmitted to and measured by the dial gage, extends through the hollow threaded stud. When the extensometer is clamped, as shown in Fig. A2.8, the desired tension which is necessary to hold the instrument in place and to remove any slack, is exerted on the roller chain by the spring. Tension on the spring may be regulated as desired by the knurled thumb screw. By removing

or adding rollers, the roller chain may be adapted for different sizes of tubular sections.

A2.4 Hardness Tests

A2.4.1 Hardness tests are made either on the outside or inside surfaces on the end of the tube as appropriate.

A2.4.2 The standard 3000-kgf Brinell load may cause too much deformation in a thin-walled tubular specimen. In this case the 500-kgf load shall be applied, or inside stiffening means of an internal anvil should be used. Brinell testing shall not be applicable to tubular products less than 2 in. (51 mm) outside diameter, or less than 0.200 in. (5.1 mm) in wall thickness.

A2.4.3 The Rockwell hardness tests are normally made on the inside surface, a flat on the outside surface, or on the wall cross-section depending upon the product limitation. Rockwell hardness tests are not performed on tubes smaller than $\frac{3}{16}$ in. (7.9 mm) in outside diameter, nor are they performed on the inside surface of tubes with less than $\frac{1}{4}$ in. (6.4 mm) inside diameter. Rockwell hardness tests are not performed on annealed tubes with walls less than 0.065 in. (1.65 mm) thick cold worked or heat treated tubes with walls less than 0.049 in. (1.24 mm) thick. For tubes with wall thicknesses less than those permitting the regular Rockwell hardness test, the Rockwell superficial Rockwell test is sometimes substituted. Transverse Rockwell hardness readings can be made on tubes with a wall thickness of 0.187 in. (4.75 mm) or greater. The curvature of the wall thickness of the specimen impose limitations on the Rockwell hardness test. When a comparison is made between Rockwell determinations made on the outside surface and determinations made on the inside surface, adjustment of the readings will be required to compensate for the effect of curvature. The Rockwell B scale is used on all materials having an expected hardness range of B0 to B100. The Rockwell C scale is used on material having an expected hardness range of C20 to C68.

A2.4.4 Superficial Rockwell hardness tests are normally performed on the outside surface whenever possible; whenever excessive spring back is not encountered. Otherwise the tests may be performed on the inside. Superficial Rockwell hardness tests shall not be performed on tubes with an inside diameter of less than $\frac{1}{4}$ in. (6.4 mm). The wall thickness limitations for the Superficial Rockwell hardness test are given in Table A2.1 and Table A2.2.

A2.4.5 When the outside diameter, inside diameter, or wall thickness precludes the obtaining of accurate hardness values, tubular products shall be specified to tensile properties and tested.

A2.5 Manipulating Tests

A2.5.1 The following tests are made to prove ductility of certain tubular products:

A2.5.1.1 *Flattening Test*—The flattening test as commonly made on specimens cut from tubular products is conducted by subjecting rings from the tube or pipe to a prescribed degree of flattening between parallel plates (Fig. A2.4). The severity of the flattening test is measured by the distance between the parallel plates and is varied according to the dimensions of the tube or pipe. The flattening test specimen should not be 1-

A 370

than 2½ in. (63.5 mm) in length and should be flattened cold to the extent required by the applicable material specifications.

A2.5.1.2 Reverse Flattening Test—The reverse flattening test is designed primarily for application to electric-welded tubing for the detection of lack of penetration or overlaps resulting from flash removal in the weld. The specimen consists of a length of tubing approximately 4 in. (102 mm) long which is split longitudinally 90° on each side of the weld. The sample is then opened and flattened with the weld at the point of maximum bend (Fig. A2.9).

A2.5.1.3 Crush Test—The crush test, sometimes referred to as an upsetting test, is usually made on boiler and other pressure tubes, for evaluating ductility (Fig. A2.10). The specimen is a ring cut from the tube, usually about 2½ in. (63.5 mm) long. It is placed on end and crushed endwise by hammer or press to the distance prescribed by the applicable material specifications.

A2.5.1.4 Flange Test—The flange test is intended to determine the ductility of boiler tubes and their ability to withstand the operation of bending into a tube sheet. The test is made on a ring cut from a tube, usually not less than 4 in. (100 mm) long and consists of having a flange turned over at right angles to the body of the tube to the width required by the applicable material specifications. The flaring tool and die block shown in Fig. A2.11 are recommended for use in making this test.

A2.5.1.5 Flaring Test—For certain types of pressure tubes, an alternate to the flange test is made. This test consists of driving a tapered mandrel having a slope of 1 in 10 as shown in Fig. A2.12 (a) or a 60° included angle as shown in Fig. A2.12 (b) into a section cut from the tube, approximately 4 in.

(100 mm) in length, and thus expanding the specimen until the inside diameter has been increased to the extent required by the applicable material specifications.

A2.5.1.6 Bend Test—For pipe used for coiling in sizes 2 in. and under a bend test is made to determine its ductility and the soundness of weld. In this test a sufficient length of full-size pipe is bent cold through 90° around a cylindrical mandrel having a diameter 12 times the nominal diameter of the pipe. For close coiling, the pipe is bent cold through 180° around a mandrel having a diameter 8 times the nominal diameter of the pipe.

A2.5.1.7 Transverse Guided Bend Test of Welds—This bend test is used to determine the ductility of fusion welds. The specimens used are approximately 1½ in. (38 mm) wide, at least 6 in. (152 mm) in length with the weld at the center, and are machined in accordance with Fig. A2.13 for face and root bend tests and in accordance with Fig. A2.14 for side bend tests. The dimensions of the plunger shall be as shown in Fig. A2.15 and the other dimensions of the bending jig shall be substantially as given in this same figure. A test shall consist of a face bend specimen and a root bend specimen or two side bend specimens. A face bend test requires bending with the inside surface of the pipe against the plunger; a root bend test requires bending with the outside surface of the pipe against the plunger; and a side bend test requires bending so that one of the side surfaces becomes the convex surface of the bend specimen.

(a) Failure of the bend test depends upon the appearance of cracks in the area of the bend, of the nature and extent described in the product specifications.

A3. STEEL FASTENERS

A3.1 Scope

A3.1.1 This supplement covers definitions and methods of testing peculiar to steel fasteners which are not covered in the general section of Test Methods and Definitions A 370. Standard tests required by the individual product specifications are to be performed as outlined in the general section of these methods.

A3.1.2 These tests are set up to facilitate production control testing and acceptance testing with certain more precise tests to be used for arbitration in case of disagreement over test results.

A3.2 Tension Tests

A3.2.1 It is preferred that bolts be tested full size, and it is customary, when so testing bolts to specify a minimum ultimate load in pounds, rather than a minimum ultimate strength in pounds per square inch. Three times the bolt nominal diameter has been established as the minimum bolt length subject to the tests described in the remainder of this section. Sections A3.2.1.1-A3.2.1.3 apply when testing bolts full size. Section A3.2.1.4 shall apply where the individual product specifications permit the use of machined specimens.

A3.2.1.1 Proof Load—Due to particular uses of certain classes of bolts it is desirable to be able to stress them, while

in use, to a specified value without obtaining any permanent set. To be certain of obtaining this quality the proof load is specified. The proof load test consists of stressing the bolt with a specified load which the bolt must withstand without permanent set. An alternate test which determines yield strength of a full size bolt is also allowed. Either of the following Methods, 1 or 2, may be used but Method 1 shall be the arbitration method in case of any dispute as to acceptance of the bolts.

A3.2.1.2 Proof Load Testing Long Bolts—When full size tests are required, proof load Method 1 is to be limited in application to bolts whose length does not exceed 8 in. (203 mm) or 8 times the nominal diameter, whichever is greater. For bolts longer than 8 in. or 8 times the nominal diameter, whichever is greater, proof load Method 2 shall be used.

(a) **Method 1, Length Measurement**—The overall length of a straight bolt shall be measured at its true center line with an instrument capable of measuring changes in length of 0.0001 in. (0.0025 mm) with an accuracy of 0.0001 in. in any 0.001-in. (0.025-mm) range. The preferred method of measuring the length shall be between conical centers machined on the center line of the bolt, with mating centers on the measuring anvils. The head or body of the bolt shall be marked so that it can be placed in the same position for all measurements. The bolt shall

 A 370

temperature or the transition temperature of full-scale specimens does not give the desired transition temperatures for Charpy or Izod tests since the size and notch geometry may be so different. Chemical analysis, tension, and hardness tests may

not indicate the influence of some of the important processing factors that affect susceptibility to brittle fracture nor do they comprehend the effect of low temperatures in inducing brittle behavior.

A6. PROCEDURE FOR CONVERTING PERCENTAGE ELONGATION OF A STANDARD ROUND TENSION TEST SPECIMEN TO EQUIVALENT PERCENTAGE ELONGATION OF A STANDARD FLAT SPECIMEN

A6.1 Scope

A6.1.1 This method specifies a procedure for converting percentage elongation after fracture obtained in a standard 0.500-in. (12.7-mm) diameter by 2-in. (51-mm) gage length test specimen to standard flat test specimens ½ in. by 2 in. and 1½ in. by 8 in. (38.1 by 203 mm).

A6.2 Basic Equation

A6.2.1 The conversion data in this method are based on an equation by Bertella,¹⁰ and used by Oliver¹¹ and others. The relationship between elongations in the standard 0.500-in. diameter by 2.0-in. test specimen and other standard specimens can be calculated as follows:

$$e = e_o [4.47 (\sqrt{A})/L] \quad (\text{A6.1})$$

where:

- e_o = percentage elongation after fracture on a standard test specimen having a 2-in. gage length and 0.500-in. diameter,
- e = percentage elongation after fracture on a standard test specimen having a gage length L and a cross-sectional area A , and
- a = constant characteristic of the test material.

A6.3 Application

A6.3.1 In applying the above equation the constant a is characteristic of the test material. The value $a = 0.4$ has been found to give satisfactory conversions for carbon, carbon-manganese, molybdenum, and chromium-molybdenum steels

within the tensile strength range of 40,000 to 85,000 psi (275 to 585 MPa) and in the hot-rolled, in the hot-rolled and normalized, or in the annealed condition, with or without tempering. Note that the cold reduced and quenched and tempered states are excluded. For annealed austenitic stainless steels, the value $a = 0.127$ has been found to give satisfactory conversions.

A6.3.2 Table A6.1 has been calculated taking $a = 0.4$, with the standard 0.500-in. (12.7-mm) diameter by 2-in. (51-mm) gage length test specimen as the reference specimen. In the case of the subsize specimens 0.350 in. (8.89 mm) in diameter, by 1.4-in. (35.6-mm) gage length, and 0.250-in. (6.35-mm) diameter by 1.0-in. (25.4-mm) gage length the factor in the equation is 4.51 instead of 4.47. The small error introduced by using Table A6.1 for the subsize specimens may be neglected. Table A6.2 for annealed austenitic steels has been calculated taking $a = 0.127$, with the standard 0.500-in. diameter by 2-in. gage length test specimen as the reference specimen.

A6.3.3 Elongation given for a standard 0.500-in. diameter by 2-in. gage length specimen may be converted to elongation for ½ in. by 2 in. or 1½ in. by 8-in. (38.1 by 203-mm) flat specimens by multiplying by the indicated factor in Table A6.1 and Table A6.2.

A6.3.4 These elongation conversions shall not be used where the width to thickness ratio of the test piece exceeds 20, as in sheet specimens under 0.025 in. (0.635 mm) in thickness.

A6.3.5 While the conversions are considered to be reliable within the stated limitations and may generally be used in specification writing where it is desirable to show equivalent elongation requirements for the several standard ASTM tension specimens covered in Test Methods A 370, consideration must be given to the metallurgical effects dependent on the thickness of the material as processed.

¹⁰ Bertella, C. A., *Giornale del Genio Civile*, Vol 60, 1922, p. 343.

¹¹ Oliver, D. A., *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1928, p. 827.

A7. METHOD OF TESTING MULTI-WIRE STRAND FOR PRESTRESSED CONCRETE

A7.1 Scope

A7.1.1 This method provides procedures for the tension testing of multi-wire strand for prestressed concrete. This method is intended for use in evaluating the strand properties prescribed in specifications for "prestressing steel strands."

A7.2 General Precautions

A7.2.1 Premature failure of the test specimens may result if there is any appreciable notching, cutting, or bending of the specimen by the gripping devices of the testing machine.

A7.2.2 Errors in testing may result if the seven wires constituting the strand are not loaded uniformly.

A7.2.3 The mechanical properties of the strand may be materially affected by excessive heating during specimen preparation.

A7.2.4 These difficulties may be minimized by following the suggested methods of gripping described in A7.4.

A7.3 Gripping Devices

A7.3.1 The true mechanical properties of the strand are determined by a test in which fracture of the specimen occurs in the free span between the jaws of the testing machine. Therefore, it is desirable to establish a test procedure with suitable apparatus which will consistently produce such results.

A 370

shear stress exceeds the shear strength of the material and deformation or plastic yielding sets in. This is the condition for ductile failure.

A5.2.4 This behavior, whether brittle or ductile, depends on whether the normal stress exceeds the cohesive strength before the shear stress exceeds the shear strength. Several important facts of notch behavior follow from this. If the notch is made sharper or more drastic, the normal stress at the root of the notch will be increased in relation to the shear stress and the bar will be more prone to brittle fracture (see Table A5.1). Also, as the speed of deformation increases, the shear strength increases and the likelihood of brittle fracture increases. On the other hand, by raising the temperature, leaving the notch and the speed of deformation the same, the shear strength is lowered and ductile behavior is promoted, leading to shear failure.

A5.2.5 Variations in notch dimensions will seriously affect the results of the tests. Tests on E 4340 steel specimens⁹ have shown the effect of dimensional variations on Charpy results (see Table A5.1).

A5.3 Size Effect

A5.3.1 Increasing either the width or the depth of the specimen tends to increase the volume of metal subject to distortion, and by this factor tends to increase the energy absorption when breaking the specimen. However, any increase in size, particularly in width, also tends to increase the degree of restraint and by tending to induce brittle fracture, may decrease the amount of energy absorbed. Where a standard-size specimen is on the verge of brittle fracture, this is particularly true, and a double-width specimen may actually require less energy for rupture than one of standard width.

A5.3.2 In studies of such effects where the size of the material precludes the use of the standard specimen, as for example when the material is 1/4-in. plate, subsize specimens are necessarily used. Such specimens (see Fig. 6 of Test Methods E 23) are based on the Type A specimen of Fig. 4 of Test Methods E 23.

A5.3.3 General correlation between the energy values obtained with specimens of different size or shape is not feasible, but limited correlations may be established for specification purposes on the basis of special studies of particular materials and particular specimens. On the other hand, in a study of the relative effect of process variations, evaluation by use of some arbitrarily selected specimen with some chosen notch will in most instances place the methods in their proper order.

A5.4 Effects of Testing Conditions

A5.4.1 The testing conditions also affect the notch behavior. So pronounced is the effect of temperature on the behavior of steel when notched that comparisons are frequently made by examining specimen fractures and by plotting energy value and fracture appearance versus temperature from tests of notched bars at a series of temperatures. When the test temperature has been carried low enough to start cleavage fracture, there may

be an extremely sharp drop in impact value or there may be a relatively gradual falling off toward the lower temperatures. This drop in energy value starts when a specimen begins to exhibit some crystalline appearance in the fracture. The transition temperature at which this embrittling effect takes place varies considerably with the size of the part or test specimen and with the notch geometry.

A5.4.2 Some of the many definitions of transition temperature currently being used are: (1) the lowest temperature at which the specimen exhibits 100 % fibrous fracture, (2) the temperature where the fracture shows a 50 % crystalline and a 50 % fibrous appearance, (3) the temperature corresponding to the energy value 50 % of the difference between values obtained at 100 % and 0 % fibrous fracture, and (4) the temperature corresponding to a specific energy value.

A5.4.3 A problem peculiar to Charpy-type tests occurs when high-strength, low-energy specimens are tested at low temperatures. These specimens may not leave the machine in the direction of the pendulum swing but rather in a sidewise direction. To ensure that the broken halves of the specimens do not rebound off some component of the machine and contact the pendulum before it completes its swing, modifications may be necessary in older model machines. These modifications differ with machine design. Nevertheless the basic problem is the same in that provisions must be made to prevent rebounding of the fractured specimens into any part of the swinging pendulum. Where design permits, the broken specimens may be deflected out of the sides of the machine and yet in other designs it may be necessary to contain the broken specimens within a certain area until the pendulum passes through the anvils. Some low-energy high-strength steel specimens leave impact machines at speeds in excess of 50 ft (15.3 m)/s although they were struck by a pendulum traveling at speeds approximately 17 ft (5.2 m)/s. If the force exerted on the pendulum by the broken specimens is sufficient, the pendulum will slow down and erroneously high energy values will be recorded. This problem accounts for many of the inconsistencies in Charpy results reported by various investigators within the 10 to 25-ft-lbf (14 to 34 J) range. The Apparatus Section (the paragraph regarding Specimen Clearance) of Test Methods E 23 discusses the two basic machine designs and a modification found to be satisfactory in minimizing jamming.

A5.5 Velocity of Straining

A5.5.1 Velocity of straining is likewise a variable that affects the notch behavior of steel. The impact test shows somewhat higher energy absorption values than the static tests above the transition temperature and yet, in some instances, the reverse is true below the transition temperature.

A5.6 Correlation with Service

A5.6.1 While Charpy or Izod tests may not directly predict the ductile or brittle behavior of steel as commonly used in large masses or as components of large structures, these tests can be used as acceptance tests of identity for different lots of the same steel or in choosing between different steels, when correlation with reliable service behavior has been established. It may be necessary to make the tests at properly chosen temperatures other than room temperature. In this, the service

⁹ Fahy, N. H., "Effects of Variables in Charpy Impact Testing," *Materials Research & Standards*, Vol. 1, No. 11, November, 1961, p. 872.

A 370

difficulties of measuring the reduced cross sections.

A4.6 Rockwell Hardness Test

A4.6.1 On heat-treated wire of diameter 0.100 in. (2.54 mm) and larger, the specimen shall be flattened on two parallel sides by grinding before testing. The hardness test is not recommended for any diameter of hard drawn wire or heat-treated wire less than 0.100 in. (2.54 mm) in diameter. For round wire, the tensile strength test is greatly preferred over the hardness test.

A4.7 Wrap Test

A4.7.1 This test is used as a means for testing the ductility of certain kinds of wire.

A4.7.2 The test consists of coiling the wire in a closely spaced helix tightly against a mandrel of a specified diameter for a required number of turns. (Unless other specified, the required number of turns shall be five.) The wrapping may be done by hand or a power device. The wrapping rate may not

exceed 15 turns per. min. The mandrel diameter shall be specified in the relevant wire product specification.

A4.7.3 The wire tested shall be considered to have failed if the wire fractures or if any longitudinal or transverse cracks develop which can be seen by the unaided eye after the first complete turn. Wire which fails in the first turn shall be retested, as such fractures may be caused by bending the wire to a radius less than specified when the test starts.

A4.8 Coiling Test

A4.8.1 This test is used to determine if imperfections are present to the extent that they may cause cracking or splitting during spring coiling and spring extension. A coil of specified length is closed wound on an arbor of a specified diameter. The closed coil is then stretched to a specified permanent increase in length and examined for uniformity of pitch with no splits or fractures. The required arbor diameter, closed coil length, and permanent coil extended length increase may vary with wire diameter, properties, and type.

AS. NOTES ON SIGNIFICANCE OF NOTCHED-BAR IMPACT TESTING

A5.1 Notch Behavior

A5.1.1 The Charpy and Izod type tests bring out notch behavior (brittleness versus ductility) by applying a single overload of stress. The energy values determined are quantitative comparisons on a selected specimen but cannot be converted into energy values that would serve for engineering design calculations. The notch behavior indicated in an individual test applies only to the specimen size, notch geometry, and testing conditions involved and cannot be generalized to other sizes of specimens and conditions.

A5.1.2 The notch behavior of the face-centered cubic metals and alloys, a large group of nonferrous materials and the austenitic steels can be judged from their common tensile properties. If they are brittle in tension they will be brittle when notched, while if they are ductile in tension, they will be ductile when notched, except for unusually sharp or deep notches (much more severe than the standard Charpy or Izod specimens). Even low temperatures do not alter this characteristic of these materials. In contrast, the behavior of the ferritic steels under notch conditions cannot be predicted from their properties as revealed by the tension test. For the study of these materials the Charpy and Izod type tests are accordingly very useful. Some metals that display normal ductility in the tension test may nevertheless break in brittle fashion when tested or when used in the notched condition. Notched conditions include restraints to deformation in directions perpendicular to the major stress, or multiaxial stresses, and stress concentrations. It is in this field that the Charpy and Izod tests prove useful for determining the susceptibility of a steel to notch-brittle behavior though they cannot be directly used to appraise the serviceability of a structure.

A5.1.3 The testing machine itself must be sufficiently rigid or tests on high-strength low-energy materials will result in excessive elastic energy losses either upward through the pendulum shaft or downward through the base of the machine.

If the anvil supports, the pendulum striking edge, or the machine foundation bolts are not securely fastened, tests on ductile materials in the range of 80 ft-lbf (108 J) may actually indicate values in excess of 90 to 100 ft-lbf (122 to 136 J).

A5.2 Notch Effect

A5.2.1 The notch results in a combination of multiaxial stresses associated with restraints to deformation in directions perpendicular to the major stress, and a stress concentration at the base of the notch. A severely notched condition is generally not desirable, and it becomes of real concern in those cases in which it initiates a sudden and complete failure of the brittle type. Some metals can be deformed in a ductile manner even down to the low temperatures of liquid air, while others may crack. This difference in behavior can be best understood by considering the cohesive strength of a material (or the property that holds it together) and its relation to the yield point. In cases of brittle fracture, the cohesive strength is exceeded before significant plastic deformation occurs and the fracture appears crystalline. In cases of the ductile or shear type of failure, considerable deformation precedes the final fracture and the broken surface appears fibrous instead of crystalline. In intermediate cases the fracture comes after a moderate amount of deformation and is part crystalline and part fibrous in appearance.

A5.2.2 When a notched bar is loaded, there is a normal stress across the base of the notch which tends to initiate fracture. The property that keeps it from cleaving, or holds it together, is the "cohesive strength." The bar fractures when the normal stress exceeds the cohesive strength. When this occurs without the bar deforming it is the condition for brittle fracture.

A5.2.3 In testing, though not in service because of side effects, it happens more commonly that plastic deformation precedes fracture. In addition to the normal stress, the applied load also sets up shear stresses which are about 45° to the normal stress. The elastic behavior terminates as soon as the

A 370

exceed the hardness limit of the product specification, for purposes of arbitration, hardness may be taken on two transverse sections through a representative sample fastener selected at random. Hardness readings shall be taken at the locations shown in Fig. A3.6. All hardness values must conform with the hardness limit of the product specification in order for the fasteners represented by the sample to be considered in compliance. This provision for arbitration of a dispute shall not be used to accept clearly rejectable fasteners.

A3.5 Testing of Nuts

A3.5.1 Proof Load—A sample nut shall be assembled on a hardened threaded mandrel or on a bolt conforming to the particular specification. A load axial with the mandrel or bolt and equal to the specified proof load of the nut shall be applied. The nut shall resist this load without stripping or rupture. If the threads of the mandrel are damaged during the test the individual test shall be discarded. The mandrel shall be threaded to American National Standard Class 3 tolerance,

except that the major diameter shall be the minimum major diameter with a tolerance of + 0.002 in. (0.051 mm).

A3.5.2 Hardness Test—Rockwell hardness of nuts shall be determined on the top or bottom face of the nut. Brinell hardness shall be determined on the side of the nuts. Either method may be used at the option of the manufacturer, taking into account the size and grade of the nuts under test. When the standard Brinell hardness test results in deforming the nut it will be necessary to use a minor load or substitute a Rockwell hardness test.

A3.6 Bars Heat Treated or Cold Drawn for Use in the Manufacture of Studs, Nuts or Other Bolting Material

A3.6.1 When the bars, as received by the manufacturer, have been processed and proved to meet certain specified properties, it is not necessary to test the finished product when these properties have not been changed by the process of manufacture employed for the finished product.

A4: ROUND WIRE PRODUCTS

A4.1 Scope

A4.1.1 This supplement covers the apparatus, specimens and methods of testing peculiar to steel wire products which are not covered in the general section of Test Methods A 370.

A4.2 Apparatus

A4.2.1 Gripping Devices—Grips of either the wedge or scabbing types as shown in Fig. A4.1 and Fig. A4.2 shall be used (Note A4.1). When using grips of either type, care shall be taken that the axis of the test specimen is located approximately at the center line of the head of the testing machine (Note A4.2). When using wedge grips the liners used behind the grips shall be of the proper thickness.

Note A4.1—Testing machines usually are equipped with wedge grips. These wedge grips, irrespective of the type of testing machine, may be referred to as the "usual type" of wedge grips. The use of fine (180 or 240) grit abrasive cloth in the "usual" wedge type grips, with the abrasive contacting the wire specimen, can be helpful in reducing specimen slipping and breakage at the grip edges at tensile loads up to about 1000 pounds. For tests of specimens of wire which are liable to be cut at the edges by the "usual type" of wedge grips, the scabbing type gripping device has proved satisfactory.

For testing round wire, the use of cylindrical seat in the wedge gripping device is optional.

Note A4.2—Any defect in a testing machine which may cause non-uniform application of load should be corrected.

A4.2.2 Pointed Micrometer—A micrometer with a pointed spindle and anvil suitable for reading the dimensions of the wire specimen at the fractured ends to the nearest 0.001 in. (0.025 mm) after breaking the specimen in the testing machine shall be used.

A4.3 Test Specimens

A4.3.1 Test specimens having the full cross-sectional area of the wire they represent shall be used. The standard gage length of the specimens shall be 10 in. (254 mm). However, if

the determination of elongation values is not required, any convenient gage length is permissible. The total length of the specimens shall be at least equal to the gage length (10 in.) plus twice the length of wire required for the full use of the grip employed. For example, depending upon the type of testing machine and grips used, the minimum total length of specimen may vary from 14 to 24 in. (360 to 610 mm) for a 10-in. gage length specimen.

A4.3.2 Any specimen breaking in the grips shall be discarded and a new specimen tested.

A4.4 Elongation

A4.4.1 In determining permanent elongation, the ends of the fractured specimen shall be carefully fitted together and the distance between the gage marks measured to the nearest 0.01 in. (0.25 mm) with dividers and scale or other suitable device. The elongation is the increase in length of the gage length, expressed as a percentage of the original gage length. In recording elongation values, both the percentage increase and the original gage length shall be given.

A4.4.2 In determining total elongation (elastic plus plastic extension) autographic or extensometer methods may be employed.

A4.4.3 If fracture takes place outside of the middle third of the gage length, the elongation value obtained may not be representative of the material.

A4.5 Reduction of Area

A4.5.1 The ends of the fractured specimen shall be carefully fitted together and the dimensions of the smallest cross section measured to the nearest 0.001 in. (0.025 mm) with a pointed micrometer. The difference between the area thus found and the area of the original cross section, expressed as a percentage of the original area, is the reduction of area.

A4.5.2 The reduction of area test is not recommended in wire diameters less than 0.092 in. (2.34 mm) due to the

 A 370

be assembled in the testing equipment as outlined in A3.2.1.4, and the proof load specified in the product specification shall be applied. Upon release of this load the length of the bolt shall be again measured and shall show no permanent elongation. A tolerance of ± 0.0005 in. (0.0127 mm) shall be allowed between the measurement made before loading and that made after loading. Variables, such as straightness and thread alignment (plus measurement error), may result in apparent elongation of the fasteners when the proof load is initially applied. In such cases, the fastener may be retested using a 3 percent greater load, and may be considered satisfactory if the length after this loading is the same as before this loading (within the 0.0005-in. tolerance for measurement error).

A3.2.1.3 Proof Load-Time of Loading—The proof load is to be maintained for a period of 10 s before release of load, when using Method 1.

(a) **Method 2, Yield Strength**—The bolt shall be assembled in the testing equipment as outlined in A3.2.1.4. As the load is applied, the total elongation of the bolt or any part of the bolt which includes the exposed six threads shall be measured and recorded to produce a load-strain or a stress-strain diagram. The load or stress at an offset equal to 0.2 percent of the length of bolt occupied by 6 full threads shall be determined by the method described in 13.2.1 of these methods, A 370. This load or stress shall not be less than that prescribed in the product specification.

A3.2.1.4 Axial Tension Testing of Full Size Bolts—Bolts are to be tested in a holder with the load axially applied between the head and a nut or suitable fixture (Fig. A3.1), either of which shall have sufficient thread engagement to develop the full strength of the bolt. The nut or fixture shall be assembled on the bolt leaving six complete bolt threads unengaged between the grips, except for heavy hexagon structural bolts which shall have four complete threads unengaged between the grips. To meet the requirements of this test there shall be a tensile failure in the body or threaded section with no failure at the junction of the body, and head. If it is necessary to record or report the tensile strength of bolts as psi values the stress area shall be calculated from the mean of the mean root and pitch diameters of Class 3 external threads as follows:

$$A_s = 0.7854[D - (0.9743/n)]^2 \quad (A3.1)$$

where:

A_s = stress area, in.²,

D = nominal diameter, in., and

n = number of threads per inch.

A3.2.1.5 Tension Testing of Full-Size Bolts with a Wedge—The purpose of this test is to obtain the tensile strength and demonstrate the "head quality" and ductility of a bolt with a standard head by subjecting it to eccentric loading. The ultimate load on the bolt shall be determined as described in A3.2.1.4, except that a 10° wedge shall be placed under the same bolt previously tested for the proof load (see A3.2.1.1). The bolt head shall be so placed that no corner of the hexagon or square takes a bearing load, that is, a flat of the head shall be aligned with the direction of uniform thickness of the wedge (Fig. A3.2). The wedge shall have an included angle of 10° between its faces and shall have a thickness of one-half of the

nominal bolt diameter at the short side of the hole. The hole in the wedge shall have the following clearance over the nominal size of the bolt, and its edges, top and bottom, shall be rounded to the following radius:

Nominal Bolt Size, in.	Clearance in Hole, in. (mm)	Radius on Corners of Hole, in. (mm)
¼ to ½	0.030 (0.76)	0.030 (0.76)
⅝ to ¾	0.050 (1.3)	0.050 (1.3)
¾ to 1	0.063 (1.6)	0.060 (1.5)
1¼ to 1½	0.063 (1.6)	0.125 (3.2)
1½ to 1¾	0.094 (2.4)	0.125 (3.2)

A3.2.1.6 Wedge Testing of HT Bolts Threaded to Head—For heat-treated bolts over 100 000 psi (690 MPa) minimum tensile strength and that are threaded 1 diameter and closer to the underside of the head, the wedge angle shall be 6° for sizes ⅝ through ¾ in. (6.35 to 19.0 mm) and 4° for sizes over ¾ in.

A3.2.1.7 Tension Testing of Bolts Machined to Round Test Specimens

(a) Bolts under 1½ in. (38 mm) in diameter which require machined tests shall preferably use a standard ½-in. (13-mm) round 2-in. (50-mm) gage length test specimen (Fig. 4). However, bolts of small cross-section that will not permit the taking of this standard test specimen shall use one of the small-size-specimens-proportional-to-standard (Fig. 4) and the specimen shall have a reduced section as large as possible. In all cases, the longitudinal axis of the specimen shall be concentric with the axis of the bolt; the head and threaded section of the bolt may be left intact, as in Fig. A3.3 and Fig. A3.4, or shaped to fit the holders or grips of the testing machine so that the load is applied axially. The gage length for measuring the elongation shall be four times the diameter of the specimen.

(b) For bolts 1½ in. and over in diameter, a standard ½-in. round 2-in. gage length test specimen shall be turned from the bolt, having its axis midway between the center and outside surface of the body of the bolt as shown in Fig. A3.5.

(c) Machined specimens are to be tested in tension to determine the properties prescribed by the product specifications. The methods of testing and determination of properties shall be in accordance with Section 13 of these test methods.

A3.3 Speed of Testing

A3.3.1 Speed of testing shall be as prescribed in the individual product specifications.

A3.4 Hardness Tests for Externally Threaded Fasteners

A3.4.1 When specified, externally threaded fasteners shall be hardness tested. Fasteners with hexagonal or square head shall be Brinell or Rockwell hardness tested on the side or top of the head. Externally threaded fasteners with other type of heads and those without heads shall be Brinell or Rockwell hardness tested on one end. Due to possible distortion from the Brinell load, care should be taken that this test meets the requirements of Section 16 of these test methods. Where the Brinell hardness test is impractical, the Rockwell hardness test shall be substituted. Rockwell hardness test procedures shall conform to Section 18 of these test methods.

A3.4.2 In cases where a dispute exists between buyer and seller as to whether externally threaded fasteners meet c

A 370

Due to inherent physical characteristics of individual machines, it is not practical to recommend a universal gripping procedure that is suitable for all testing machines. Therefore, it is necessary to determine which of the methods of gripping described in A7.3.2 to A7.3.8 is most suitable for the testing equipment available.

A7.3.2 Standard V-Grips with Serrated Teeth (Note A7.1).

A7.3.3 Standard V-Grips with Serrated Teeth (Note A7.1), Using Cushioning Material—In this method, some material is placed between the grips and the specimen to minimize the notching effect of the teeth. Among the materials which have been used are lead foil, aluminum foil, carborundum cloth, bra shims, etc. The type and thickness of material required is dependent on the shape, condition, and coarseness of the teeth.

A7.3.4 Standard V-Grips with Serrated Teeth (Note A7.1), Using Special Preparation of the Gripped Portions of the Specimen—One of the methods used is tinning, in which the gripped portions are cleaned, fluxed, and coated by multiple dips in molten tin alloy held just above the melting point. Another method of preparation is encasing the gripped portions in metal tubing or flexible conduit, using epoxy resin as the bonding agent. The encased portion should be approximately twice the length of lay of the strand.

A7.3.5 Special Grips with Smooth, Semi-Cylindrical Grooves (Note A7.2)—The grooves and the gripped portions of the specimen are coated with an abrasive slurry which holds the specimen in the smooth grooves, preventing slippage. The slurry consists of abrasive such as Grade 3-F aluminum oxide and a carrier such as water or glycerin.

A7.3.6 Standard Sockets of the Type Used for Wire Rope—The gripped portions of the specimen are anchored in the sockets with zinc. The special procedures for socketing usually employed in the wire rope industry must be followed.

A7.3.7 Dead-End Eye Splices—These devices are available in sizes designed to fit each size of strand to be tested.

A7.3.8 Chucking Devices—Use of chucking devices of the type generally employed for applying tension to strands in casting beds is not recommended for testing purposes.

Note A7.1—The number of teeth should be approximately 15 to 30 per in., and the minimum effective gripping length should be approximately 4 in. (102 mm).

Note A7.2—The radius of curvature of the grooves is approximately the same as the radius of the strand being tested, and is located $\frac{1}{2}$ in. (12.7 mm) above the flat face of the grip. This prevents the two grips from closing tightly when the specimen is in place.

A7.4 Specimen Preparation

A7.4.1 If the molten-metal temperatures employed during

hot-dip tinning or socketing with metallic material are too high, over approximately 700°F (370°C), the specimen may be heat affected with a subsequent loss of strength and ductility. Careful temperature controls should be maintained if such methods of specimen preparation are used.

A7.5 Procedure

A7.5.1 Yield Strength—For determining the yield strength use a Class B-1 extensometer (Note A7.3) as described in Practice E 83. Apply an initial load of 10 % of the expected minimum breaking strength to the specimen, then attach the extensometer and adjust it to a reading of 0.001 in./in. of gage length. Then increase the load until the extensometer indicates an extension of 1 %. Record the load for this extension as the yield strength. The extensometer may be removed from the specimen after the yield strength has been determined.

A7.5.2 Elongation—For determining the elongation use a Class D extensometer (Note A7.3), as described in Practice E 83, having a gage length of not less than 24 in. (610 mm) (Note A7.4). Apply an initial load of 10 % of the required minimum breaking strength to the specimen, then attach the extensometer (Note A7.3) and adjust it to a zero reading. The extensometer may be removed from the specimen prior to rupture after the specified minimum elongation has been exceeded. It is not necessary to determine the final elongation value.

A7.5.3 Breaking Strength—Determine the maximum load at which one or more wires of the strand are fractured. Record this load as the breaking strength of the strand.

Note A7.3—The yield-strength extensometer and the elongation extensometer may be the same instrument or two separate instruments. Two separate instruments are advisable since the more sensitive yield-strength extensometer, which could be damaged when the strand fractures, may be removed following the determination of yield strength. The elongation extensometer may be constructed with less sensitive parts or be constructed in such a way that little damage would result if fracture occurs while the extensometer is attached to the specimen.

Note A7.4—Specimens that break outside the extensometer or in the jaws and yet meet the minimum specified values are considered as meeting the mechanical property requirements of the product specification, regardless of what procedure of gripping has been used. Specimens that break outside of the extensometer or in the jaws and do not meet the minimum specified values are subject to retest. Specimens that break between the jaws and the extensometer and do not meet the minimum specified values are subject to retest as provided in the applicable specification.

A8. ROUNDING OF TEST DATA

A8.1 Rounding

A8.1.1 An observed value or a calculated value shall be rounded off in accordance with the applicable product specification. In the absence of a specified procedure, the rounding-off method of Practice E 29 shall be used.

A8.1.1.1 Values shall be rounded up or rounded down as

determined by the rules of Practice E 29.

A8.1.1.2 In the special case of rounding the number "5" when no additional numbers other than "0" follow the "5," rounding shall be done in the direction of the specification limits if following Practice E 29 would cause rejection of material.



A 370

TABLE 1 Multiplying Factors to Be Used for Various Diameters of Round Test Specimens

Standard Specimen			Small Size Specimens Proportional to Standard					
0.500 in. Round			0.350 in. Round			0.250 in. Round		
Actual Diameter, in.	Area, in. ²	Multiplying Factor	Actual Diameter, in.	Area, in. ²	Multiplying Factor	Actual Diameter, in.	Area, in. ²	Multiplying Factor
0.490	0.1886	5.30	0.343	0.0924	10.82	0.245	0.0471	21.21
0.491	0.1893	5.28	0.344	0.0929	10.76	0.246	0.0475	21.04
0.492	0.1901	5.26	0.345	0.0935	10.70	0.247	0.0479	20.87
0.493	0.1909	5.24	0.346	0.0940	10.64	0.248	0.0483	20.70
0.494	0.1917	5.22	0.347	0.0946	10.57	0.249	0.0487	20.54
0.495	0.1924	5.20	0.348	0.0951	10.51	0.250	0.0491	20.37
0.496	0.1932	5.18	0.349	0.0957	10.45	0.251	0.0495	20.21
							(0.05) ^A	(20.0) ^A
0.497	0.1940	5.15	0.350	0.0962	10.39	0.252	0.0499	20.05
							(0.05) ^A	(20.0) ^A
0.498	0.1948	5.13	0.351	0.0968	10.33	0.253	0.0503	19.89
							(0.05) ^A	(20.0) ^A
0.499	0.1956	5.11	0.352	0.0973	10.28	0.254	0.0507	19.74
0.500	0.1963	5.09	0.353	0.0979	10.22	0.255	0.0511	19.58
0.501	0.1971	5.07	0.354	0.0984	10.16			
0.502	0.1979	5.05	0.355	0.0990	10.10			
0.503	0.1987	5.03	0.356	0.0995	10.05			
				(0.1) ^A	(10.0) ^A			
0.504	0.1995	5.01	0.357	0.1001	9.99			
	(0.2) ^A	(5.0) ^A		(0.1) ^A	(10.0) ^A			
0.505	0.2003	4.99						
	(0.2) ^A	(5.0) ^A						
0.506	0.2011	4.97						
	(0.2) ^A	(5.0) ^A						
0.507	0.2019	4.95						
0.508	0.2027	4.93						
0.509	0.2035	4.91						
0.510	0.2043	4.90						

^AThe values in parentheses may be used for ease in calculation of stresses, in pounds per square inch, as permitted in Note 5 of Fig. 4.

 A 370

Number 1, Section IX of the Code) forgings and bars with a nominal thickness or diameter of 2 in. (51 mm) or less, the test specimens shall be given a heat treatment to simulate any thermal treatments below the critical temperature that the forgings and bars may receive during fabrication. The simulated heat treatment shall utilize temperatures, times, and cooling rates as specified on the order. The total time at temperature(s) for the test material shall be at least 80 % of the total time at temperature(s) to which the forgings and bars are subjected during postweld heat treatment. The total time at temperature(s) for the test specimens may be performed in a single cycle.

A10.5.3.3 Prior to heat treatment in the simulator unit, test specimens shall be machined to standard sizes that have been determined to allow adequately for subsequent removal of decarb and oxidation.

A10.5.3.4 At least one thermocouple per specimen shall be used for continuous recording of temperature on an independent external temperature-monitoring source. Due to the sensitivity and design peculiarities of the heating chamber of certain equipment, it is mandatory that the hot junctions of control and monitoring thermocouples always be placed in the same relative position with respect to the heating source (generally infra red lamps).

A10.5.3.5 Each individual specimen shall be identified, and such identification shall be clearly shown on the simulator chart and simulator cycle record.

A10.5.3.6 The simulator chart shall be compared to the master chart for accurate reproduction of simulated quench in accordance with A10.5.3.2(a). If any one specimen is not heat treated within the acceptable limits of temperature and time, such specimen shall be discarded and replaced by a newly machined specimen. Documentation of such action and reasons for deviation from the master chart shall be shown on the

simulator chart, and on the corresponding nonconformance report.

A10.5.4 Reheat Treatment and Retesting:


A10.5.4.1 In the event of a test failure, retesting shall be handled in accordance with rules set forth by the material specification.

A10.5.4.2 If retesting is permissible, a new test specimen shall be heat treated the same as previously. The production forging that it represents will have received the same heat treatment. If the test passes, the forging shall be acceptable. If it fails, the forging shall be rejected or shall be subject to reheat treatment if permissible.

A10.5.4.3 If reheat treatment is permissible, proceed as follows: (1) Reheat treatment same as original heat treatment (time, temperature, cooling rate): Using new test specimens from an area as close as possible to the original specimens, repeat the austenitize and quench cycles twice, followed by the tempering cycle (double quench and temper). The production forging shall be given the identical double quench and temper as its test specimens above. (2) Reheat treatment using a new heat treatment practice. Any change in time, temperature, or cooling rate shall constitute a new heat treatment practice. A new master curve shall be produced and the simulation and testing shall proceed as originally set forth.

A10.5.4.4 In summation, each test specimen and its corresponding forging shall receive identical heat treatment or heat treatment; otherwise the testing shall be invalid.

A10.5.5 *Storage, Recall, and Documentation of Heat-Cycle Simulation Data*—All records pertaining to heat-cycle simulation shall be maintained and held for a period of 10 years or as designed by the customer. Information shall be so organized that all practices can be verified by adequate documented records.

 A 370

ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII, Division 2, latest edition.

A10.4 Terminology

A10.4.1 Definitions:

A10.4.1.1 master chart— a record of the heat treatment received from a forging essentially identical to the production forgings that it will represent. It is a chart of time and temperature showing the output from thermocouples imbedded in the forging at the designated test immersion and test location or locations.

A10.4.1.2 program chart— the metallized sheet used to program the simulator unit. Time-temperature data from the master chart are manually transferred to the program chart.

A10.4.1.3 simulator chart— a record of the heat treatment that a test specimen had received in the simulator unit. It is a chart of time and temperature and can be compared directly to the master chart for accuracy of duplication.

A10.4.1.4 simulator cycle— one continuous heat treatment of a set of specimens in the simulator unit. The cycle includes heating from ambient, holding at temperature, and cooling. For example, a simulated austenitize and quench of a set of specimens would be one cycle; a simulated temper of the same specimens would be another cycle.

A10.5 Procedure

A10.5.1 Production Master Charts:

A10.5.1.1 Thermocouples shall be imbedded in each forging from which a master chart is obtained. Temperature shall be monitored by a recorder with resolution sufficient to clearly define all aspects of the heating, holding, and cooling process. All charts are to be clearly identified with all pertinent information and identification required for maintaining permanent records.

A10.5.1.2 Thermocouples shall be imbedded 180 deg apart if the material specification requires test locations 180 deg apart.

A10.5.1.3 One master chart (or two if required in accordance with A10.5.3.1) shall be produced to represent essentially identical forgings (same size and shape). Any change in size or geometry (exceeding rough machining tolerances) of a forging will necessitate that a new master cooling curve be developed.

A10.5.1.4 If more than one curve is required per master forging (180 deg apart) and a difference in cooling rate is achieved, then the most conservative curve shall be used as the master curve.

A10.5.2 Reproducibility of Heat Treatment Parameters on Production Forgings:

A10.5.2.1 All information pertaining to the quench and temper of the master forging shall be recorded on an appropriate permanent record, similar to the one shown in Table A10.1.

A10.5.2.2 All information pertaining to the quench and temper of the production forgings shall be appropriately recorded, preferably on a form similar to that used in A10.5.2.1. Quench records of production forgings shall be retained for future reference. The quench and temper record of the master forging shall be retained as a permanent record.

A10.5.2.3 A copy of the master forging record shall be stored with the heat treatment record of the production forging.

A10.5.2.4 The essential variables, as set forth on the heat treat record, shall be controlled within the given parameters on the production forging.

A10.5.2.5 The temperature of the quenching medium prior to quenching each production forging shall be equal to or lower than the temperature of the quenching medium prior to quenching the master forging.

A10.5.2.6 The time elapsed from opening the furnace door to quench for the production forging shall not exceed that elapsed for the master forging.

A10.5.2.7 If the time parameter is exceeded in opening the furnace door to beginning of quench, the forging shall be placed back into the furnace and brought back up to equalization temperature.

A10.5.2.8 All forgings represented by the same master forging shall be quenched with like orientation to the surface of the quench bath.

A10.5.2.9 All production forgings shall be quenched in the same quench tank, with the same agitation as the master forging.

A10.5.2.10 Uniformity of Heat Treat Parameters—(1) The difference in actual heat treating temperature between production forgings and the master forging used to establish the simulator cycle for them shall not exceed $\pm 25^\circ\text{F}$ ($\pm 14^\circ\text{C}$) for the quench cycle. (2) The tempering temperature of the production forgings shall not fall below the actual tempering temperature of the master forging. (3) At least one contact surface thermocouple shall be placed on each forging in a production load. Temperature shall be recorded for all surface thermocouples on a Time Temperature Recorder and such records shall be retained as permanent documentation.

A10.5.3 Heat-Cycle Simulation:

A10.5.3.1 Program charts shall be made from the data recorded on the master chart. All test specimens shall be given the same heating rate above the AC1, the same holding time and the same cooling rate as the production forgings.

A10.5.3.2 The heating cycle above the AC1, a portion of the holding cycle, and the cooling portion of the master chart shall be duplicated and the allowable limits on temperature and time, as specified in (a)–(c), shall be established for verification of the adequacy of the simulated heat treatment.

(a) **Heat Cycle Simulation of Test Coupon Heat Treatment for Quenched and Tempered Forgings and Bars**—If cooling rate data for the forgings and bars and cooling rate control devices for the test specimens are available, the test specimens may be heat-treated in the device.

(b) The test coupons shall be heated to substantially the same maximum temperature as the forgings or bars. The test coupons shall be cooled at a rate similar to and no faster than the cooling rate representative of the test locations and shall be within 25°F (14°C) and 20 s at all temperatures after cooling begins. The test coupons shall be subsequently heat-treated in accordance with the thermal treatments below the critical temperature including tempering and simulated post weld heat treatment.

(c) **Simulated Post Weld Heat Treatment of Test Specimens** (for ferritic steel forgings and bars)—Except for carbon steel (P

 A 370

A8.1.2 Recommended levels for rounding reported values of test data are given in Table A8.1. These values are designed to provide uniformity in reporting and data storage, and should be used in all cases except where they conflict with specific requirements of a product specification.

should be carried to at least one figure beyond that of the final (rounded) value during intervening calculations (such as calculation of stress from load and area measurements) with rounding occurring as the final operation. The precision may be less than that implied by the number of significant figures.

NOTE A8.1—To minimize cumulative errors, whenever possible, values

A9. METHODS FOR TESTING STEEL REINFORCING BARS

A9.1 Scope

A9.1.1 This annex covers additional details specific to testing steel reinforcing bars for use in concrete reinforcement.

A9.2 Test Specimens

A9.2.1 All test specimens shall be the full section of the bar as rolled.

A9.3 Tension Testing

A9.3.1 *Test Specimen*—Specimens for tension tests shall be long enough to provide for an 8-in. (200-mm) gage length, a distance of at least two bar diameters between each gage mark and the grips, plus sufficient additional length to fill the grips completely leaving some excess length protruding beyond each grip.

A9.3.2 *Gripping Device*—The grips shall be shimmed so that no more than 1/2 in. (13 mm) of a grip protrudes from the head of the testing machine.

A9.3.3 *Gage Marks*—The 8-in. (200-mm) gage length shall be marked on the specimen using a preset 8-in. (200-mm) punch or, alternately, may be punch marked every 2 in. (50 mm) along the 8-in. (200-mm) gage length, on one of the longitudinal ribs, if present, or in clear spaces of the deformation pattern. The punch marks shall not be put on a transverse deformation. Light punch marks are desirable because deep marks severely indent the bar and may affect the results. A bullet-nose punch is desirable.

A9.3.4 The yield strength or yield point shall be determined by one of the following methods:

A9.3.4.1 Extension under load using an autographic dia-

gram method or an extensometer as described in 13.1.2 and 13.1.3.

A9.3.4.2 By the drop of the beam or halt in the gage of the testing machine as described in 13.1.1 where the steel tested as a sharp-kneed or well-defined type of yield point.

A9.3.5 The unit stress determinations for yield and tensile strength on full-size specimens shall be based on the nominal bar area.

A9.4 Bend Testing

A9.4.1 Bend tests shall be made on specimens of sufficient length to ensure free bending and with apparatus which provides:

A9.4.1.1 Continuous and uniform application of force throughout the duration of the bending operation,

A9.4.1.2 Unrestricted movement of the specimen at points of contact with the apparatus and bending around a pin free to rotate, and

A9.4.1.3 Close wrapping of the specimen around the pin during the bending operation.

A9.4.2 Other acceptable more severe methods of bend testing, such as placing a specimen across two pins free to rotate and applying the bending force with a fix pin, may be used.

A9.4.3 When re-testing is permitted by the product specification, the following shall apply:

A9.4.3.1 Sections of bar containing identifying roll marking shall not be used.

A9.4.3.2 Bars shall be so placed that longitudinal ribs lie in a plane at right angles to the plane of bending.

A10. PROCEDURE FOR USE AND CONTROL OF HEAT-CYCLE SIMULATION

A10.1 Purpose

A10.1.1 To ensure consistent and reproducible heat treatments of production forgings and the test specimens that represent them when the practice of heat-cycle simulation is used.

A10.2 Scope

A10.2.1 Generation and documentation of actual production time-temperature curves (MASTER CHARTS).

A10.2.2 Controls for duplicating the master cycle during heat treatment of production forgings. (Heat treating within the essential variables established during A1.2.1).

A10.2.3 Preparation of program charts for the simulator unit.

A10.2.4 Monitoring and inspection of the simulated cycle within the limits established by the ASME Code.

A10.2.5 Documentation and storage of all controls, inspections, charts, and curves.

A10.3 Referenced Documents

A10.3.1 *ASME Standards*¹²:

ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, latest edition.

¹² Available from American Society of Mechanical Engineers, 345 E. 47th St., New York, NY 10017



A 370

TABLE 2 Approximate Hardness Conversion Numbers for Non-austenitic Steels⁴ (Rockwell C to other Hardness Numbers)

Rockwell C Scale, 150-kgf Load, Diamond Penetrator	Vickers Hardness Number	Brinell Hardness, 3000-kgf Load, 10-mm Ball	Knoop Hardness, 500-gf Load and Over	Rockwell A Scale, 60-kgf Load, Diamond Penetrator	Rockwell Superficial Hardness			Approximate Tensile Strength, ksi (MPa)
					15N Scale, 15-kgf Load, Diamond Penetrator	30N Scale, 30-kgf Load, Diamond Penetrator	45N Scale, 45-kgf Load, Diamond Penetrator	
68	940	—	920	65.6	93.2	84.4	75.4	—
67	900	—	895	65.0	92.9	83.6	74.2	—
66	865	—	870	64.5	92.5	82.8	73.9	—
65	832	739	846	63.9	92.2	81.9	72.0	—
64	800	722	822	63.4	91.8	81.1	71.0	—
63	772	706	799	62.8	91.4	80.1	69.9	—
62	746	688	776	62.3	91.1	79.3	68.8	—
61	720	670	754	61.8	90.7	78.4	67.7	—
60	697	654	732	61.2	90.2	77.5	66.6	—
59	674	634	710	60.7	89.8	76.6	65.5	351 (2420)
58	653	615	690	60.1	89.3	75.7	64.3	338 (2330)
57	633	595	670	59.6	88.9	74.8	63.2	325 (2240)
56	613	577	650	59.0	88.3	73.9	62.0	313 (2160)
55	595	560	630	58.5	87.9	73.0	60.9	301 (2070)
54	577	543	612	58.0	87.4	72.0	59.8	292 (2010)
53	560	525	594	57.4	86.9	71.2	58.6	283 (1950)
52	544	512	576	56.8	86.4	70.2	57.4	273 (1880)
51	528	496	558	56.3	85.9	69.4	56.1	264 (1820)
50	513	482	542	55.9	85.5	68.5	55.0	255 (1760)
49	498	468	526	55.2	85.0	67.6	53.8	246 (1700)
48	484	455	510	54.7	84.5	66.7	52.5	238 (1640)
47	471	442	495	54.1	83.9	65.8	51.4	229 (1580)
46	458	432	480	53.6	83.5	64.8	50.3	221 (1520)
45	446	421	466	53.1	83.0	64.0	49.0	215 (1480)
44	434	409	452	52.5	82.5	63.1	47.8	208 (1430)
43	423	400	438	52.0	82.0	62.2	46.7	201 (1390)
42	412	390	426	51.5	81.5	61.3	45.5	194 (1340)
41	402	381	414	50.9	80.9	60.4	44.3	188 (1300)
40	392	371	402	50.4	80.4	59.5	43.1	182 (1250)
39	382	362	391	49.9	79.9	58.6	41.9	177 (1220)
38	372	353	380	49.4	79.4	57.7	40.8	171 (1180)
37	363	344	370	48.9	78.8	56.8	39.6	166 (1140)
36	354	336	360	48.4	78.3	55.9	38.4	161 (1110)
35	345	327	351	47.9	77.7	55.0	37.2	156 (1080)
34	336	319	342	47.4	77.2	54.2	36.1	152 (1050)
33	327	311	334	46.8	76.6	53.3	34.9	149 (1030)
32	318	301	326	46.3	76.1	52.1	33.7	146 (1010)
31	310	294	318	45.8	75.6	51.3	32.5	141 (970)
30	302	286	311	45.3	75.0	50.4	31.3	138 (950)
29	294	279	304	44.6	74.5	49.5	30.1	135 (930)
28	286	271	297	44.3	73.9	48.6	28.9	131 (900)
27	279	264	290	43.8	73.3	47.7	27.8	128 (880)
26	272	258	284	43.3	72.8	46.8	26.7	125 (860)
25	266	253	278	42.8	72.2	45.9	25.5	123 (850)
24	260	247	272	42.4	71.6	45.0	24.3	119 (820)
23	254	243	266	42.0	71.0	44.0	23.1	117 (810)
22	248	237	261	41.5	70.5	43.2	22.0	115 (790)
21	243	231	256	41.0	69.9	42.3	20.7	112 (770)
20	238	226	251	40.5	69.4	41.5	19.6	110 (760)

⁴ This table gives the approximate interrelationships of hardness values and approximate tensile strength of steels. It is possible that steels of various compositions and processing histories will deviate in hardness-tensile strength relationship from the data presented in this table. The data in this table should not be used for austenitic stainless steels, but have been shown to be applicable for ferritic and martensitic stainless steels. The data in this table should not be used to establish a relationship between hardness values and tensile strength of hard drawn wire. Where more precise conversions are required, they should be developed specially for each steel composition, heat treatment, and part.



A 370

TABLE 5. Approximate Hardness Conversion Numbers for Austenitic Steels (Rockwell B to other Hardness Numbers)

Rockwell B Scale, 100- kgf Load, $\frac{1}{16}$ - in. (1.588- mm) Ball	Brinell Indentation Diameter, mm	Brinell Hardness, 3000-kgf Load, 10-mm Ball	Rockwell A Scale, 60-kgf Load, Diamond Penetrator	Rockwell Superficial Hardness		
				15T Scale, 15-kgf Load, $\frac{1}{16}$ -in. (1.588- mm) Ball	30T Scale, 30-kgf Load, $\frac{1}{16}$ -in. (1.588- mm) Ball	45T Scale, 45-kgf Load, $\frac{1}{16}$ -in. (1.588- mm) Ball
100	3.79	256	61.5	91.5	80.4	70.2
99	3.85	248	60.9	91.2	79.7	69.2
98	3.91	240	60.3	90.8	79.0	68.2
97	3.96	233	59.7	90.4	78.3	67.2
96	4.02	226	59.1	90.1	77.7	66.1
95	4.08	219	58.5	89.7	77.0	65.1
94	4.14	213	58.0	89.3	76.3	64.1
93	4.20	207	57.4	88.9	75.6	63.1
92	4.24	202	56.8	88.6	74.9	62.1
91	4.30	197	56.2	88.2	74.2	61.1
90	4.35	192	55.6	87.8	73.5	60.1
89	4.40	187	55.0	87.5	72.8	59.0
88	4.45	183	54.5	87.1	72.1	58.0
87	4.51	178	53.9	86.7	71.4	57.0
86	4.55	174	53.3	86.4	70.7	56.0
85	4.60	170	52.7	86.0	70.0	55.0
84	4.65	167	52.1	85.6	69.3	54.0
83	4.70	163	51.5	85.2	68.6	52.9
82	4.74	160	50.9	84.9	67.9	51.9
81	4.79	156	50.4	84.5	67.2	50.9
80	4.84	153	49.8	84.1	66.5	49.9



TABLE 3 Continued

Rockwell B Scale, 100-kgf Load 1/16-in. (1.588-mm) Ball	Vickers Hardness Number	Brinell Hardness, 3000-kgf Load, 10-mm Ball	Knoop Hardness, 500-gf Load and Over	Rockwell A Scale, 60-kgf Load, Diamond Penetrator	Rockwell F Scale, 60-kgf Load, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	Rockwell Superficial Hardness			Approximate Tensile Strength, KSI (MPa)
						15T Scale, 15-kgf Load, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	30T Scale, 30-kgf Load, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	45T Scale, 45-kgf Load, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	
32	--	--	89	27.4	75.2	71.0	37.6	4.6	--
31	--	--	88	27.0	74.6	70.7	37.0	3.6	--
30	--	--	87	26.6	74.0	70.4	36.3	2.6	--

* This table gives the approximate interrelationships of hardness values and approximate tensile strength of steels. It is possible that steels of various compositions and processing histories will deviate in hardness-tensile strength relationship from the data presented in this table. The data in this table should not be used for austenitic stainless steels, but have been shown to be applicable for ferritic and martensitic stainless steels. The data in this table should not be used to establish a relationship between hardness values and tensile strength of hard drawn wire. Where more precise conversions are required, they should be developed specially for each steel composition, heat treatment, and part.

TABLE 4 Approximate Hardness Conversion Numbers for Austenitic Steels (Rockwell C to other Hardness Numbers)

Rockwell C Scale, 150-kgf Load, Diamond Penetrator	Rockwell A Scale, 60-kgf Load, Diamond Penetrator	Rockwell Superficial Hardness		
		15N Scale, 15-kgf Load, Diamond Penetrator	30N Scale, 30-kgf Load, Diamond Penetrator	45N Scale, 45-kgf Load, Diamond Penetrator
48	74.4	84.1	66.2	52.1
47	73.9	83.6	65.3	50.9
46	73.4	83.1	64.5	49.8
45	72.9	82.6	63.6	48.7
44	72.4	82.1	62.7	47.5
43	71.9	81.6	61.8	46.4
42	71.4	81.0	61.0	45.2
41	70.9	80.5	60.1	44.1
40	70.4	80.0	59.2	43.0
39	69.9	79.5	58.4	41.8
38	69.3	79.0	57.5	40.7
37	68.8	78.5	56.6	39.6
36	68.3	78.0	55.7	38.4
35	67.8	77.5	54.9	37.3
34	67.3	77.0	54.0	36.1
33	66.8	76.5	53.1	35.0
32	66.3	75.9	52.3	33.9
31	65.8	75.4	51.4	32.7
30	65.3	74.9	50.5	31.6
29	64.8	74.4	49.6	30.4
28	64.3	73.9	48.8	29.3
27	63.8	73.4	47.9	28.2
26	63.3	72.9	47.0	27.0
25	62.8	72.4	46.2	25.9
24	62.3	71.9	45.3	24.8
23	61.8	71.3	44.4	23.6
22	61.3	70.8	43.5	22.5
21	60.8	70.3	42.7	21.3
20	60.3	69.8	41.8	20.2

A 370

TABLE 3 Continued

Rockwell B Scale, 100-kgf Load $\frac{1}{16}$ -in. (1.588-mm) Ball	Vickers Hardness Number	Brinell Hardness, 3000-kgf Load, 10-mm Ball	Knoop Hardness, 500-gf Load and Over	Rockwell A Scale, 60-kgf Load, Diamond Penetrator	Rockwell F Scale, 60-kgf Load, $\frac{1}{16}$ -in. (1.588-mm) Ball	Rockwell Superficial Hardness			Approximate Tensile Strength (ksi (MPa))
						15T Scale, 15-kgf Load, $\frac{1}{16}$ -in. (1.588-mm) Ball	30T Scale, 30-kgf Load, $\frac{1}{16}$ -in. (1.588-mm) Ball	45T Scale, 45-kgf Load, $\frac{1}{16}$ -in. (1.588-mm) Ball	
32	--	--	89	27.4	75.2	71.0	37.6	4.6	--
31	--	--	88	27.0	74.6	70.7	37.0	3.6	--
30	--	--	87	26.6	74.0	70.4	36.3	2.6	--

^a This table gives the approximate interrelationships of hardness values and approximate tensile strength of steels. It is possible that steels of various compositions or processing histories will deviate in hardness-tensile strength relationship from the data presented in this table. The data in this table should not be used for austenitic stainless steels, but have been shown to be applicable for ferritic and martensitic stainless steels. The data in this table should not be used to establish a relationship between hardness values and tensile strength of hard drawn wire. Where more precise conversions are required, they should be developed specially for each steel composition, heat treatment, and part.

TABLE 4 Approximate Hardness Conversion Numbers for Austenitic Steels (Rockwell C to other Hardness Numbers)

Rockwell C Scale, 150-kgf Load, Diamond Penetrator	Rockwell A Scale, 60-kgf Load, Diamond Penetrator	Rockwell Superficial Hardness		
		15N Scale, 15-kgf Load, Diamond Penetrator	30N Scale, 30-kgf Load, Diamond Penetrator	45N Scale, 45-kgf Load, Diamond Penetrator
48	74.4	84.1	66.2	52.1
47	73.9	83.6	65.3	50.9
46	73.4	83.1	64.5	49.8
45	72.9	82.6	63.6	48.7
44	72.4	82.1	62.7	47.5
43	71.9	81.6	61.8	46.4
42	71.4	81.0	61.0	45.2
41	70.9	80.5	60.1	44.1
40	70.4	80.0	59.2	43.0
39	69.9	79.5	58.4	41.8
38	69.3	79.0	57.5	40.7
37	68.8	78.5	56.6	39.6
36	68.3	78.0	55.7	38.4
35	67.8	77.5	54.9	37.3
34	67.3	77.0	54.0	36.1
33	66.8	76.5	53.1	35.0
32	66.3	75.9	52.3	33.9
31	65.8	75.4	51.4	32.7
30	65.3	74.9	50.5	31.6
29	64.8	74.4	49.6	30.4
28	64.3	73.9	48.8	29.3
27	63.8	73.4	47.9	28.2
26	63.3	72.9	47.0	27.0
25	62.8	72.4	46.2	25.9
24	62.3	71.9	45.3	24.8
23	61.8	71.3	44.4	23.6
22	61.3	70.8	43.5	22.5
21	60.8	70.3	42.7	21.3
20	60.3	69.8	41.8	20.2

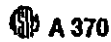


TABLE 3 Approximate Hardness Conversion Numbers for Non-austenitic Steels^a (Rockwell B to other Hardness Numbers)

Rockwell B Scale, 100 kgf Load 1/16 in. (1.588- mm) Ball	Vickers Hardness Number	Brinell Hardness, 3000-kgf Load, 10-mm Ball	Knoop Hardness, 500-gf Load and Over	Rockwell A Scale, 60-kgf Load, Diamond Penetrator	Rockwell F Scale, 60-kgf Load, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	Rockwell Superficial Hardness			Approximate Tensile Strength ksi (MPa)
						15T Scale, 15-kgf Load, 1/16-in. (1.588- mm) Ball	30T Scale, 30-kgf Load, 1/16-in. (1.588- mm) Ball	45T Scale, 45-kgf Load, 1/16-in. (1.588- mm) Ball	
100	240	240	251	61.5	—	93.1	83.1	72.9	116 (800)
99	234	234	246	60.9	—	92.8	82.5	71.9	114 (785)
98	228	228	241	60.2	—	92.5	81.8	70.9	109 (750)
97	222	222	236	59.5	—	92.1	81.1	69.9	104 (715)
96	216	216	231	58.9	—	91.8	80.4	68.9	102 (705)
95	210	210	226	58.3	—	91.5	79.8	67.9	100 (690)
94	205	205	221	57.8	—	91.2	79.1	66.9	98 (675)
93	200	200	216	57.0	—	90.8	78.4	65.9	94 (650)
92	195	195	211	56.4	—	90.5	77.7	64.8	92 (635)
91	190	190	206	55.8	—	90.2	77.1	63.8	90 (620)
90	185	185	201	55.2	—	89.9	76.4	62.8	89 (615)
89	180	180	196	54.6	—	89.5	75.8	61.8	88 (605)
88	178	176	192	54.0	—	89.2	75.1	60.8	86 (590)
87	172	172	188	53.4	—	88.9	74.4	59.8	84 (580)
86	169	169	184	52.8	—	88.6	73.8	58.8	83 (570)
85	165	165	180	52.3	—	88.2	73.1	57.8	82 (565)
84	162	162	176	51.7	—	87.9	72.4	56.8	81 (560)
83	159	159	173	51.1	—	87.6	71.8	55.8	80 (550)
82	156	156	170	50.6	—	87.3	71.1	54.8	77 (530)
81	153	153	167	50.0	—	86.9	70.4	53.8	73 (505)
80	150	150	164	49.5	—	86.6	69.7	52.8	72 (495)
79	147	147	161	48.9	—	86.3	69.1	51.8	70 (485)
78	144	144	158	48.4	—	86.0	68.4	50.8	69 (475)
77	141	141	155	47.9	—	85.6	67.7	49.8	68 (470)
76	139	139	152	47.3	—	85.3	67.1	48.8	67 (460)
75	137	137	150	46.8	99.8	85.0	66.4	47.8	66 (455)
74	135	135	147	46.3	99.1	84.7	65.7	46.8	65 (450)
73	132	132	145	45.8	98.5	84.3	65.1	45.8	64 (440)
72	130	130	143	45.3	98.0	84.0	64.4	44.8	63 (435)
71	127	127	141	44.8	97.4	83.7	63.7	43.8	62 (425)
70	125	125	139	44.3	96.8	83.4	63.1	42.8	61 (420)
69	123	123	137	43.8	96.2	83.0	62.4	41.8	60 (415)
68	121	121	135	43.3	95.6	82.7	61.7	40.8	59 (405)
67	119	119	133	42.8	95.1	82.4	61.0	39.8	58 (400)
66	117	117	131	42.3	94.5	82.1	60.4	38.7	57 (395)
65	116	116	129	41.8	93.9	81.8	59.7	37.7	56 (385)
64	114	114	127	41.4	93.4	81.4	59.0	36.7	—
63	112	112	125	40.9	92.8	81.1	58.4	35.7	—
62	110	110	124	40.4	92.2	80.8	57.7	34.7	—
61	108	108	122	40.0	91.7	80.5	57.0	33.7	—
60	107	107	120	39.5	91.1	80.1	56.4	32.7	—
59	106	106	118	39.0	90.5	79.8	55.7	31.7	—
58	104	104	117	38.6	90.0	79.5	55.0	30.7	—
57	103	103	115	38.1	89.4	79.2	54.4	29.7	—
56	101	101	114	37.7	88.8	78.8	53.7	28.7	—
55	100	100	112	37.2	88.2	78.5	53.0	27.7	—
54	—	—	111	36.8	87.7	78.2	52.4	26.7	—
53	—	—	110	36.3	87.1	77.9	51.7	25.7	—
52	—	—	109	35.9	86.5	77.5	51.0	24.7	—
51	—	—	108	35.5	86.0	77.2	50.3	23.7	—
50	—	—	107	35.0	85.4	76.9	49.7	22.7	—
49	—	—	106	34.6	84.8	76.6	49.0	21.7	—
48	—	—	105	34.1	84.3	76.2	48.3	20.7	—
47	—	—	104	33.7	83.7	75.9	47.7	19.7	—
46	—	—	103	33.3	83.1	75.6	47.0	18.7	—
45	—	—	102	32.9	82.6	75.3	46.3	17.7	—
44	—	—	101	32.4	82.0	74.9	45.7	16.7	—
43	—	—	100	32.0	81.4	74.6	45.0	15.7	—
42	—	—	99	31.6	80.8	74.3	44.3	14.7	—
41	—	—	98	31.2	80.3	74.0	43.7	13.6	—
40	—	—	97	30.7	79.7	73.6	43.0	12.6	—
39	—	—	96	30.3	79.1	73.3	42.3	11.6	—
38	—	—	95	29.9	78.6	73.0	41.6	10.6	—
37	—	—	94	29.5	78.0	72.7	41.0	9.6	—
36	—	—	93	29.1	77.4	72.3	40.3	8.6	—
35	—	—	92	28.7	76.9	72.0	39.6	7.6	—
34	—	—	91	28.2	76.3	71.7	39.0	6.6	—
33	—	—	90	27.8	75.7	71.4	38.3	5.6	—

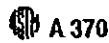


TABLE 6 Brinell Hardness Numbers^a
(Ball 10 mm in Diameter, Applied Loads of 500, 1500, and 3000 kgf)

Diameter of Indenter, mm	Brinell Hardness Number			Diameter of Indenter, mm	Brinell Hardness Number			Diameter of Indenter, mm	Brinell Hardness Number			Diameter of Indenter, mm	Brinell Hardness Number		
	500-kgf Load	1500-kgf Load	3000-kgf Load		500-kgf Load	1500-kgf Load	3000-kgf Load		500-kgf Load	1500-kgf Load	3000-kgf Load		500-kgf Load	1500-kgf Load	3000-kgf Load
2.00	158	473	945	2.60	92.6	278	555	3.20	60.5	182	363	3.80	42.4	127	255
2.01	156	468	936	2.61	91.8	276	551	3.21	60.1	180	361	3.81	42.2	127	253
2.02	154	463	926	2.62	91.1	273	547	3.22	59.8	179	359	3.82	42.0	126	252
2.03	153	459	917	2.63	90.4	271	543	3.23	59.4	178	356	3.83	41.7	125	250
2.04	151	454	908	2.64	89.7	269	538	3.24	59.0	177	354	3.84	41.5	125	249
2.05	150	450	899	2.65	89.0	267	534	3.25	58.6	176	352	3.85	41.3	124	248
2.06	148	445	890	2.66	88.4	265	530	3.26	58.3	175	350	3.86	41.1	123	246
2.07	147	441	882	2.67	87.7	263	526	3.27	57.9	174	347	3.87	40.9	123	245
2.08	146	437	873	2.68	87.0	261	522	3.28	57.5	173	345	3.88	40.6	122	244
2.09	144	432	865	2.69	86.4	259	518	3.29	57.2	172	343	3.89	40.4	121	242
2.10	143	428	856	2.70	85.7	257	514	3.30	56.8	170	341	3.90	40.2	121	241
2.11	141	424	848	2.71	85.1	255	510	3.31	56.5	169	339	3.91	40.0	120	240
2.12	140	420	840	2.72	84.4	253	507	3.32	56.1	168	337	3.92	39.8	119	239
2.13	139	416	832	2.73	83.8	251	503	3.33	55.8	167	335	3.93	39.6	119	237
2.14	137	412	824	2.74	83.2	250	499	3.34	55.4	166	333	3.94	39.4	118	236
2.15	136	408	817	2.75	82.6	248	495	3.35	55.1	165	331	3.95	39.1	117	235
2.16	135	404	809	2.76	81.9	246	492	3.36	54.8	164	329	3.96	38.9	117	234
2.17	134	401	802	2.77	81.3	244	488	3.37	54.4	163	326	3.97	38.7	116	232
2.18	132	397	794	2.78	80.8	242	485	3.38	54.1	162	325	3.98	38.5	116	231
2.19	131	393	787	2.79	80.2	240	481	3.39	53.8	161	323	3.99	38.3	115	230
2.20	130	390	780	2.80	79.6	239	477	3.40	53.4	160	321	4.00	38.1	114	229
2.21	129	386	772	2.81	79.0	237	474	3.41	53.1	159	319	4.01	37.9	114	228
2.22	128	383	765	2.82	78.4	235	471	3.42	52.8	158	317	4.02	37.7	113	226
2.23	126	379	758	2.83	77.9	234	467	3.43	52.5	157	315	4.03	37.5	113	225
2.24	125	376	752	2.84	77.3	232	464	3.44	52.2	156	313	4.04	37.3	112	224
2.25	124	372	745	2.85	76.8	230	461	3.45	51.8	156	311	4.05	37.1	111	223
2.26	123	369	738	2.86	76.2	229	457	3.46	51.5	155	309	4.06	37.0	111	222
2.27	122	366	732	2.87	75.7	227	454	3.47	51.2	154	307	4.07	36.8	110	221
2.28	121	363	725	2.88	75.1	225	451	3.48	50.9	153	306	4.08	36.6	110	219
2.29	120	359	719	2.89	74.6	224	448	3.49	50.6	152	304	4.09	36.4	109	218
2.30	119	356	712	2.90	74.1	222	444	3.50	50.3	151	302	4.10	36.2	109	217
2.31	118	353	706	2.91	73.6	221	441	3.51	50.0	150	300	4.11	36.0	108	216
2.32	117	350	700	2.92	73.0	219	438	3.52	49.7	149	298	4.12	35.8	108	215
2.33	116	347	694	2.93	72.5	218	435	3.53	49.4	148	297	4.13	35.7	107	214
2.34	115	344	688	2.94	72.0	216	432	3.54	49.2	147	295	4.14	35.5	106	213
2.35	114	341	682	2.95	71.5	215	429	3.55	48.9	147	293	4.15	35.3	106	212
2.36	113	338	676	2.96	71.0	213	426	3.56	48.6	146	292	4.16	35.1	105	211
2.37	112	335	670	2.97	70.5	212	423	3.57	48.3	145	290	4.17	34.9	105	210
2.38	111	332	665	2.98	70.1	210	420	3.58	48.0	144	288	4.18	34.8	104	209
2.39	110	330	659	2.99	69.6	209	417	3.59	47.7	143	286	4.19	34.6	104	208
2.40	109	327	653	3.00	69.1	207	415	3.60	47.5	142	285	4.20	34.4	103	207
2.41	108	324	648	3.01	68.6	206	412	3.61	47.2	142	283	4.21	34.2	103	205
2.42	107	322	643	3.02	68.2	205	409	3.62	46.9	141	282	4.22	34.1	102	204
2.43	106	319	637	3.03	67.7	203	406	3.63	46.7	140	280	4.23	33.9	102	203
2.44	105	316	632	3.04	67.3	202	404	3.64	46.4	139	278	4.24	33.7	101	202
2.45	104	313	627	3.05	66.8	200	401	3.65	46.1	138	277	4.25	33.6	101	201
2.46	104	311	621	3.06	66.4	199	398	3.66	45.9	138	275	4.26	33.4	100	200
2.47	103	308	616	3.07	65.9	198	395	3.67	45.6	137	274	4.27	33.2	99.7	199
2.48	102	306	611	3.08	65.5	196	393	3.68	45.4	136	272	4.28	33.1	99.2	198
2.49	101	303	606	3.09	65.0	195	390	3.69	45.1	135	271	4.29	32.9	98.8	198
2.50	100	301	601	3.10	64.6	194	388	3.70	44.9	135	269	4.30	32.8	98.3	197
2.51	99.4	298	597	3.11	64.2	193	385	3.71	44.6	134	268	4.31	32.6	97.8	196
2.52	98.6	296	592	3.12	63.8	191	383	3.72	44.4	133	266	4.32	32.4	97.3	195
2.53	97.8	294	587	3.13	63.3	190	380	3.73	44.1	132	265	4.33	32.3	96.8	194
2.54	97.1	291	582	3.14	62.9	189	378	3.74	43.9	132	263	4.34	32.1	96.4	193
2.55	96.3	289	578	3.15	62.5	188	375	3.75	43.6	131	262	4.35	32.0	95.9	192
2.56	95.5	287	573	3.16	62.1	186	373	3.76	43.4	130	260	4.36	31.8	95.5	191
2.57	94.8	284	569	3.17	61.7	185	370	3.77	43.1	129	259	4.37	31.7	95.0	190
2.58	94.0	282	564	3.18	61.3	184	368	3.78	42.9	129	257	4.38	31.5	94.5	189
2.59	93.3	280	560	3.19	60.9	183	366	3.79	42.7	128	256	4.39	31.4	94.1	188
4.40	31.2	93.6	187	5.05	23.3	69.8	140	5.70	17.8	53.5	107	6.35	14.0	42.0	84.0
4.41	31.1	93.2	186	5.06	23.2	69.5	139	5.71	17.8	53.3	107	6.36	13.9	41.8	83.7
4.42	30.9	92.7	185	5.07	23.1	69.2	138	5.72	17.7	53.1	106	6.37	13.9	41.7	83.5
4.43	30.8	92.3	185	5.08	23.0	68.9	138	5.73	17.6	52.9	106	6.38	13.8	41.5	83.1
4.44	30.6	91.8	184	5.09	22.9	68.6	137	5.74	17.6	52.7	105	6.39	13.8	41.4	82.8
4.45	30.5	91.4	183	5.10	22.8	68.3	137	5.75	17.5	52.5	105	6.40	13.7	41.2	82.5
4.46	30.3	91.0	182	5.11	22.7	68.0	136	5.76	17.4	52.3	105	6.41	13.7	41.1	82.2
4.47	30.2	90.5	181	5.12	22.6	67.7	135	5.77	17.4	52.1	104	6.42	13.6	40.9	81.9
4.48	30.0	90.1	180	5.13	22.5	67.4	135	5.78	17.3	51.9	104	6.43	13.6	40.8	81.6

 A 370

TABLE A1.2 Recommended Practice for Selecting Bend Test Specimens for Steel Bar Products

NOTE 1—The length of all specimens is to be not less than 6 in. (150 mm).

NOTE 2—The edges of the specimen may be rounded to a radius not exceeding $\frac{1}{16}$ in. (1.6 mm).

Flats		
Thickness, in. (mm)	Width, in. (mm)	Recommended Size
Up to $\frac{1}{2}$ (13), incl	Up to $\frac{3}{4}$ (19), incl Over $\frac{3}{4}$ (19)	Full section. Full section or machine to not less than $\frac{3}{4}$ in. (19 mm) in width by thickness of specimen.
Over $\frac{1}{2}$ (13)	All	Full section or machine to 1 by $\frac{1}{2}$ in. (25 by 13 mm) specimen from midway be- tween center and surface.
Rounds, Squares, Hexagons, and Octagons		
Diameter or Distance Between Parallel Faces, in. (mm)		Recommended Size
Up to $1\frac{1}{2}$ (38), incl Over $1\frac{1}{2}$ (38)		Full section. Machine to 1 by $\frac{1}{2}$ in. (25 by 13-mm) specimen from midway between center and surface.

TABLE A2.1 Wall Thickness Limitations of Superficial Hardness Test on Annealed or Ductile Materials for Steel Tubular Products^A (T¹ Scale ($\frac{1}{16}$ -in. Ball))

Wall Thickness, in. (mm)	Load, kgf
Over 0.050 (1.27)	45
Over 0.035 (0.89)	30
0.020 and over (0.51)	15

^A The heaviest load recommended for a given wall thickness is generally used.TABLE A2.2 Wall Thickness Limitations of Superficial Hardness Test on Cold Worked or Heat Treated Material for Steel Tubular Products^A (T² Scale (Diamond Penetrator))

Wall Thickness, in. (mm)	Load, kgf
Over 0.035 (0.89)	45
Over 0.025 (0.51)	30
0.015 and over (0.38)	15

^A The heaviest load recommended for a given wall thickness is generally used.

TABLE A5.1 Effect of Varying Notch Dimensions on Standard Specimens

	High-Energy Specimens, ft-lb (J)	High-Energy Specimens, ft-lb (J)	Low-Energy Specimens, ft-lb (J)
Specimen with standard dimensions	76.0 \pm 3.8 (103.0 \pm 5.2)	44.5 \pm 2.2 (60.3 \pm 3.0)	12.5 \pm 1.0 (16.9 \pm 1.4)
Depth of notch, 0.084 in. (2.13 mm) ^A	72.2 (97.9)	41.3 (56.0)	11.4 (15.5)
Depth of notch, 0.0805 in. (2.04 mm) ^A	75.1 (101.8)	42.2 (57.2)	12.4 (16.6)
Depth of notch, 0.0775 in. (1.77 mm) ^A	76.6 (104.1)	45.3 (61.4)	12.7 (17.2)
Depth of notch, 0.074 in. (1.57 mm) ^A	79.6 (107.9)	46.0 (62.4)	12.8 (17.3)
Radius at base of notch, 0.005 in. (0.127 mm) ^B	72.3 (98.0)	11.7 (56.5)	10.8 (14.5)
Radius at base of notch, 0.015 in. (0.381 mm) ^B	80.0 (108.5)	47.4 (64.3)	15.0 (21.4)

^A Standard 0.079 \pm 0.002 in. (2.00 \pm 0.05 mm).^B Standard 0.010 \pm 0.001 in. (0.25 \pm 0.025 mm).


 A 370

TABLE A1.1 Practices for Selecting Tension Test Specimens for Steel Bar Products

NOTE 1—For bar sections where it is difficult to determine the cross-sectional area by simple measurement, the area in square inches may be calculated by dividing the weight per linear inch of specimen in pounds by 0.2833 (weight of 1 in.³ of steel) or by dividing the weight per linear foot of specimen by 3.4 (weight of steel 1 in. square and 1 ft long).

Thickness, in. (mm)	Width, in. (mm)	Hot-Rolled Bars	Cold-Finished Bars
Flats			
Under ½ (16)	Up to 1½ (38), incl	Full section by 8-in. (203-mm) gage length (Fig. 4).	Mill reduced section to 2-in. (51-mm) gage length and approximately 25% less than test specimen width.
	Over 1½ (38)	Full section, or mill to 1½ in. (38 mm) wide by 8-in. (203-mm) gage length (Fig. 4).	Mill reduced section to 2-in. gage length and 1½ in. wide.
½ to 1½ (16 to 38), excl	Up to 1½ (38), incl	Full section by 8-in. gage length or machine standard ½ by 2-in. (13 by 51-mm) gage length specimen from center of section (Fig. 5).	Mill reduced section to 2-in. (51-mm) gage length and approximately 25% less than test specimen width or machine standard ½ by 2-in. (13 by 51-mm) gage length specimen from center of section (Fig. 5).
	Over 1½ (38)	Full section, or mill 1½ in. (38 mm) width by 8-in. (203-mm) gage length (Fig. 4) or machine standard ½ by 2-in. gage (13 by 51-mm) gage length specimen from midway between edge and center of section (Fig. 5).	Mill reduced section to 2-in. gage length and 1½ in. wide or machine standard ½ by 2-in. gage length specimen from midway between edge and center of section (Fig. 5).
1½ (38) and over		Full section by 8-in. (203-mm) gage length, or machine standard ½ by 2 in. (13 by 51-mm) gage length specimen from midway between surface and center (Fig. 5).	Machine standard ½ by 2-in. (13 by 51-mm) gage length specimen from midway between surface and center (Fig. 5).
Rounds, Squares, Hexagons, and Octagons			
Diameter or Distance Between Parallel Faces, in. (mm)		Hot-Rolled Bars	Cold-Finished Bars
Under ½		Full section by 8-in. (203-mm) gage length or machine to sub-size specimen (Fig. 5).	Machine to sub-size specimen (Fig. 5).
½ to 1½ (16 to 38), excl		Full section by 8-in. (203-mm) gage length or machine standard ½ in. by 2-in. (13 by 51-mm) gage length specimen from center of section (Fig. 5).	Machine standard ½ in. by 2-in. gage length specimen from center of section (Fig. 5).
1½ (38) and over		Full section by 8-in. (203-mm) gage length or machine standard ½ in. by 2-in. (13 by 51-mm) gage length specimen from midway between surface and center of section (Fig. 5).	Machine standard ½ in. by 2-in. (13 by 51-mm) gage length specimen from midway between surface and center of section (Fig. 5).
Other Bar-Size Sections			
All sizes		Full section by 8-in. (203-mm) gage length or prepare test specimen 1½ in. (38 mm) wide (if possible) by 8-in. (203-mm) gage length.	Mill reduced section to 2-in. (51-mm) gage length and approximately 25% less than test specimen width.

A 370

TABLE 7 Percent Shear for Measurements Made in Inches

NOTE 1—Since this table is set up for finite measurements or dimensions A and B, 100% shear is to be reported when either A or B is zero.

Dimension A, in.	Dimension A, in.																
	0.05	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40
0.05	98	96	95	94	94	93	92	91	90	90	89	88	87	86	85	85	84
0.10	96	92	90	89	87	85	84	82	81	79	77	76	74	73	71	69	68
0.12	95	90	88	86	85	83	81	79	77	75	73	71	69	67	65	63	61
0.14	94	89	86	84	82	80	77	75	73	71	68	66	64	62	59	57	55
0.16	94	87	85	82	79	77	74	72	69	67	64	61	59	56	53	51	48
0.18	93	85	83	80	77	74	72	68	65	62	59	56	54	51	48	45	42
0.20	92	84	81	77	74	72	68	65	61	58	55	52	48	45	42	39	36
0.22	91	82	79	75	72	68	65	61	57	54	50	47	43	40	36	33	29
0.24	90	81	77	73	69	65	61	57	54	50	46	42	38	34	30	27	23
0.26	90	79	75	71	67	62	58	54	50	46	41	37	33	29	25	20	16
0.28	89	77	73	68	64	59	55	50	46	41	37	32	28	23	18	14	10
0.30	88	76	71	66	61	56	52	47	42	37	32	27	23	18	13	9	3
0.31	88	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	16	10	5	0

TABLE 8 Percent Shear for Measurements Made in Millimetres

NOTE 1—Since this table is set up for finite measurements or dimensions A and B, 100% shear is to be reported when either A or B is zero.

Dimension A, mm	Dimension A, mm																		
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10
1.0	99	98	98	97	96	96	95	94	94	93	92	92	91	91	90	89	89	88	88
1.5	98	97	96	95	94	93	92	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81
2.0	98	96	95	94	92	91	90	89	88	86	85	84	82	81	80	79	77	76	75
2.5	97	95	94	92	91	89	88	86	84	83	81	80	78	77	75	73	72	70	69
3.0	96	94	92	91	89	87	85	83	81	79	77	76	74	72	70	68	66	64	62
3.5	96	93	91	89	87	85	82	80	78	76	74	72	69	67	65	63	61	58	56
4.0	95	92	90	88	85	82	80	77	75	72	70	67	65	62	60	57	55	52	50
4.5	94	92	89	86	83	80	77	75	72	69	66	63	61	58	55	52	49	46	44
5.0	94	91	88	85	81	78	75	72	69	66	62	59	56	53	50	47	44	41	37
5.5	93	90	86	83	79	76	72	69	66	62	59	55	52	48	45	42	38	35	31
6.0	92	89	85	81	77	74	70	66	62	59	55	51	47	44	40	36	33	29	25
6.5	92	88	84	80	76	72	67	63	59	55	51	47	43	39	35	31	27	23	19
7.0	91	87	82	78	74	69	65	61	56	52	47	43	39	34	30	26	21	17	12
7.5	91	86	81	77	72	67	62	58	53	48	44	39	34	30	25	20	16	11	6
8.0	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0

TABLE 9 Charpy V-Notch Test Acceptance Criteria for Various Sub-Size Specimens

Full Size, 10 by 10 mm		¾ Size, 10 by 7.5 mm		½ Size, 10 by 6.7 mm		¼ Size, 10 by 5 mm		⅓ Size, 10 by 3.3 mm		⅕ Size, 10 by 2.5 mm	
ft-lb/	[J]	ft-lb/	[J]	ft-lb/	[J]	ft-lb/	[J]	ft-lb/	[J]	ft-lb/	[J]
40	[54]	30	[41]	27	[37]	20	[27]	13	[18]	10	[14]
35	[48]	26	[35]	23	[31]	18	[24]	12	[16]	9	[12]
30	[41]	22	[30]	20	[27]	15	[20]	10	[14]	8	[11]
25	[34]	19	[26]	17	[23]	12	[16]	8	[11]	5	[7]
20	[27]	15	[20]	13	[18]	10	[14]	7	[10]	5	[7]
16	[22]	12	[16]	11	[15]	8	[11]	5	[7]	4	[5]
15	[20]	11	[15]	10	[14]	8	[11]	5	[7]	4	[5]
13	[18]	10	[14]	9	[12]	6	[8]	4	[5]	3	[4]
12	[16]	9	[12]	8	[11]	6	[8]	4	[5]	3	[4]
10	[14]	8	[11]	7	[10]	5	[7]	3	[4]	2	[3]
7	[10]	5	[7]	5	[7]	4	[5]	2	[3]	2	[3]

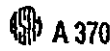


TABLE 6 Continued

Diameter of Indentation, mm	Brinell Hardness Number			Diameter of Indentation, mm	Brinell Hardness Number			Diameter of Indentation, mm	Brinell Hardness Number			Diameter of Indentation, mm	Brinell Hardness Number		
	500-kgf Load	1500-kgf Load	3000-kgf Load		500-kgf Load	1500-kgf Load	3000-kgf Load		500-kgf Load	1500-kgf Load	3000-kgf Load		500-kgf Load	1500-kgf Load	3000-kgf Load
4.49	29.9	89.7	179	5.14	22.4	67.1	134	5.79	17.2	51.7	103	6.44	13.5	40.6	81.3
4.50	29.8	89.3	179	5.15	22.3	66.9	134	5.80	17.2	51.5	103	6.45	13.5	40.5	81.0
4.51	29.6	88.8	178	5.16	22.2	66.6	133	5.81	17.1	51.3	103	6.46	13.4	40.4	80.7
4.52	29.5	88.4	177	5.17	22.1	66.3	133	5.82	17.0	51.1	102	6.47	13.4	40.2	80.4
4.53	29.3	88.0	176	5.18	22.0	66.0	132	5.83	17.0	50.9	102	6.48	13.4	40.1	80.1
4.54	29.2	87.6	175	5.19	21.9	65.8	132	5.84	16.9	50.7	101	6.49	13.3	39.9	79.8
4.55	29.1	87.2	174	5.20	21.8	65.5	131	5.85	16.8	50.5	101	6.50	13.3	39.8	79.6
4.56	28.9	86.8	174	5.21	21.7	65.2	130	5.86	16.8	50.3	101	6.51	13.2	39.6	79.3
4.57	28.8	86.4	173	5.22	21.6	64.9	130	5.87	16.7	50.2	100	6.52	13.2	39.5	79.0
4.58	28.7	86.0	172	5.23	21.6	64.7	129	5.88	16.7	50.0	99.9	6.53	13.1	39.4	78.7
4.59	28.5	85.6	171	5.24	21.5	64.4	129	5.89	16.6	49.8	99.5	6.54	13.1	39.2	78.4
4.60	28.4	85.4	170	5.25	21.4	64.1	128	5.90	16.5	49.6	99.2	6.55	13.0	39.1	78.2
4.61	28.3	84.8	170	5.26	21.3	63.9	128	5.91	16.5	49.4	98.8	6.56	13.0	38.9	78.0
4.62	28.1	84.4	169	5.27	21.2	63.6	127	5.92	16.4	49.2	98.4	6.57	12.9	38.8	77.6
4.63	28.0	84.0	168	5.28	21.1	63.3	127	5.93	16.3	49.0	98.0	6.58	12.9	38.7	77.3
4.64	27.9	83.6	167	5.29	21.0	63.1	126	5.94	16.3	48.8	97.7	6.59	12.8	38.5	77.1
4.65	27.8	83.3	167	5.30	20.9	62.8	126	5.95	16.2	48.7	97.3	6.60	12.8	38.4	76.8
4.66	27.6	82.9	166	5.31	20.9	62.6	125	5.96	16.2	48.5	96.9	6.61	12.8	38.3	76.5
4.67	27.5	82.5	165	5.32	20.8	62.3	125	5.97	16.1	48.3	96.6	6.62	12.7	38.1	76.2
4.68	27.4	82.1	164	5.33	20.7	62.1	124	5.98	16.0	48.1	96.2	6.63	12.7	38.0	76.0
4.69	27.3	81.8	164	5.34	20.6	61.8	124	5.99	16.0	47.9	95.9	6.64	12.6	37.9	75.7
4.70	27.1	81.4	163	5.35	20.5	61.5	123	6.00	15.9	47.7	95.5	6.65	12.6	37.7	75.4
4.71	27.0	81.0	162	5.36	20.4	61.3	123	6.01	15.9	47.6	95.1	6.66	12.5	37.6	75.2
4.72	26.9	80.7	161	5.37	20.3	61.0	122	6.02	15.8	47.4	94.8	6.67	12.5	37.5	74.9
4.73	26.8	80.3	161	5.38	20.3	60.8	122	6.03	15.7	47.2	94.4	6.68	12.4	37.3	74.7
4.74	26.6	79.9	160	5.39	20.2	60.6	121	6.04	15.7	47.0	94.1	6.69	12.4	37.2	74.4
4.75	26.5	79.6	159	5.40	20.1	60.3	121	6.05	15.6	46.8	93.7	6.70	12.4	37.1	74.1
4.76	26.4	79.2	158	5.41	20.0	60.1	120	6.06	15.6	46.7	93.4	6.71	12.3	36.9	73.9
4.77	26.3	78.9	158	5.42	19.9	59.8	120	6.07	15.5	46.5	93.0	6.72	12.3	36.8	73.6
4.78	26.2	78.5	157	5.43	19.9	59.6	119	6.08	15.4	46.3	92.7	6.73	12.2	36.7	73.4
4.79	26.1	78.2	156	5.44	19.8	59.3	119	6.09	15.4	46.2	92.3	6.74	12.2	36.6	73.1
4.80	25.9	77.8	156	5.45	19.7	59.1	118	6.10	15.3	46.0	92.0	6.75	12.1	36.4	72.8
4.81	25.8	77.5	155	5.46	19.6	58.9	118	6.11	15.3	45.8	91.7	6.76	12.1	36.3	72.6
4.82	25.7	77.1	154	5.47	19.5	58.6	117	6.12	15.2	45.7	91.3	6.77	12.1	36.2	72.3
4.83	25.6	76.8	154	5.48	19.5	58.4	117	6.13	15.2	45.5	91.0	6.78	12.0	36.0	72.1
4.84	25.5	76.4	153	5.49	19.4	58.2	116	6.14	15.1	45.3	90.6	6.79	12.0	35.9	71.8
4.85	25.4	76.1	152	5.50	19.3	57.9	116	6.15	15.1	45.2	90.3	6.80	11.9	35.8	71.6
4.86	25.3	75.8	152	5.51	19.2	57.7	115	6.16	15.0	45.0	90.0	6.81	11.9	35.7	71.3
4.87	25.1	75.4	151	5.52	19.2	57.5	115	6.17	14.9	44.8	89.6	6.82	11.8	35.5	71.1
4.88	25.0	75.1	150	5.53	19.1	57.2	114	6.18	14.9	44.7	89.3	6.83	11.8	35.4	70.8
4.89	24.9	74.8	150	5.54	19.0	57.0	114	6.19	14.8	44.5	89.0	6.84	11.7	35.3	70.6
4.90	24.8	74.4	149	5.55	18.9	56.8	114	6.20	14.7	44.3	88.7	6.85	11.7	35.2	70.4
4.91	24.7	74.1	148	5.56	18.9	56.6	113	6.21	14.7	44.2	88.3	6.86	11.7	35.1	70.1
4.92	24.6	73.8	148	5.57	18.8	56.3	113	6.22	14.7	44.0	88.0	6.87	11.6	34.9	69.9
4.93	24.5	73.5	147	5.58	18.7	56.1	112	6.23	14.6	43.8	87.7	6.88	11.6	34.8	69.6
4.94	24.4	73.2	146	5.59	18.6	55.9	112	6.24	14.6	43.7	87.4	6.89	11.6	34.7	69.4
4.95	24.3	72.8	146	5.60	18.6	55.7	111	6.25	14.5	43.5	87.1	6.90	11.5	34.6	69.2
4.96	24.2	72.5	145	5.61	18.5	55.5	111	6.26	14.5	43.4	86.7	6.91	11.5	34.5	68.9
4.97	24.1	72.2	144	5.62	18.4	55.2	110	6.27	14.4	43.2	86.4	6.92	11.5	34.3	68.7
4.98	24.0	71.9	144	5.63	18.3	55.0	110	6.28	14.4	43.1	86.1	6.93	11.4	34.2	68.4
4.99	23.9	71.6	143	5.64	18.3	54.8	110	6.29	14.3	42.9	85.8	6.94	11.4	34.1	68.2
5.00	23.9	71.3	143	5.65	18.2	54.6	109	6.30	14.2	42.7	85.5	6.95	11.4	34.0	68.0
5.01	23.7	71.0	142	5.66	18.1	54.4	109	6.31	14.2	42.6	85.2	6.96	11.3	33.9	67.7
5.02	23.6	70.7	141	5.67	18.1	54.2	108	6.32	14.1	42.4	84.9	6.97	11.3	33.8	67.5
5.03	23.5	70.4	141	5.68	18.0	54.0	108	6.33	14.1	42.3	84.6	6.98	11.3	33.6	67.3
5.04	23.4	70.1	140	5.69	17.9	53.7	107	6.34	14.0	42.1	84.3	6.99	11.2	33.5	67.0

*Prepared by the Engineering Mechanics Section, Institute for Standards Technology.

A 370

TABLE A6.1 Carbon and Alloy Steels—Material Constant $a = 0.4$.
 Multiplication Factors for Converting Percent Elongation from
 1/2-in. Diameter by 2-in. Gage Length Standard Tension Test
 Specimen to Standard 1/2 by 2-in. and 1 1/2 by 8-in. Flat Specimens

Thickness, in.	1/2 by 2-in. Specimen	1 1/2 by 8-in. Specimen	Thickness in.	1 1/2 by 8-in. Specimen
0.025	0.574	—	0.800	0.822
0.030	0.596	—	0.850	0.832
0.035	0.614	—	0.900	0.841
0.040	0.631	—	0.950	0.850
0.045	0.646	—	1.000	0.859
0.050	0.660	—	1.125	0.880
0.055	0.672	—	1.250	0.898
0.060	0.684	—	1.375	0.916
0.065	0.695	—	1.500	0.932
0.070	0.706	—	1.625	0.947
0.075	0.715	—	1.750	0.961
0.080	0.725	—	1.875	0.974
0.085	0.733	—	2.000	0.987
0.090	0.742	0.531	2.125	0.999
0.100	0.750	0.542	2.250	1.010
0.110	0.772	0.553	2.375	1.021
0.120	0.786	0.562	2.500	1.032
0.130	0.799	0.571	2.625	1.042
0.140	0.810	0.580	2.750	1.052
0.150	0.821	0.588	2.875	1.061
0.160	0.832	0.596	3.000	1.070
0.170	0.843	0.603	3.125	1.079
0.180	0.852	0.610	3.250	1.088
0.190	0.862	0.616	3.375	1.096
0.200	0.870	0.623	3.500	1.104
0.225	0.891	0.638	3.625	1.112
0.250	0.910	0.651	3.750	1.119
0.275	0.928	0.664	3.875	1.127
0.300	0.944	0.675	4.000	1.134
0.325	0.959	0.686	—	—
0.350	0.973	0.696	—	—
0.375	0.987	0.706	—	—
0.400	1.000	0.715	—	—
0.425	1.012	0.724	—	—
0.450	1.024	0.732	—	—
0.475	1.035	0.740	—	—
0.500	1.045	0.748	—	—
0.525	1.056	0.755	—	—
0.550	1.066	0.762	—	—
0.575	1.075	0.770	—	—
0.600	1.084	0.776	—	—
0.625	1.093	0.782	—	—
0.650	1.101	0.788	—	—
0.675	1.110	—	—	—
0.700	1.118	0.800	—	—
0.725	1.126	—	—	—
0.750	1.134	0.811	—	—

**TABLE A6.2 Annealed Austenitic Stainless Steels—Material
 Constant $a = 0.127$.** Multiplication Factors for Converting Percent
 Elongation from 1/2-in. Diameter by 2-in. Gage Length Standard
 Tension Test Specimen to Standard 1/2 by 2-in. and 1 1/2 by 8-in.
 Flat Specimens

Thickness, in.	1/2 by 2-in. Specimen	1 1/2 by 8-in. Specimen	Thickness, in.	1 1/2 by 8-in. Specimen
0.025	0.839	—	0.800	0.940
0.030	0.848	—	0.850	0.943
0.035	0.857	—	0.900	0.947
0.040	0.864	—	0.950	0.950
0.045	0.870	—	1.000	0.953
0.050	0.876	—	1.125	0.960
0.055	0.882	—	1.250	0.966
0.060	0.886	—	1.375	0.972
0.065	0.891	—	1.500	0.978
0.070	0.895	—	1.625	0.983
0.075	0.899	—	1.750	0.987
0.080	0.903	—	1.875	0.992
0.085	0.906	—	2.000	0.996
0.090	0.909	0.818	2.125	1.000
0.095	0.913	0.821	2.250	1.003
0.100	0.916	0.823	2.375	1.007
0.110	0.921	0.828	2.500	1.010
0.120	0.926	0.833	2.625	1.013
0.130	0.931	0.837	2.750	1.016
0.140	0.935	0.841	2.875	1.019
0.150	0.940	0.845	3.000	1.022
0.160	0.943	0.848	3.125	1.024
0.170	0.947	0.852	3.250	1.027
0.180	0.950	0.855	3.375	1.029
0.190	0.954	0.858	3.500	1.032
0.200	0.957	0.860	3.625	1.034
0.225	0.964	0.867	3.750	1.036
0.250	0.970	0.873	3.875	1.038
0.275	0.976	0.878	4.000	1.041
0.300	0.982	0.883	—	—
0.325	0.987	0.887	—	—
0.350	0.991	0.892	—	—
0.375	0.996	0.895	—	—
0.400	1.000	0.899	—	—
0.425	1.004	0.903	—	—
0.450	1.007	0.906	—	—
0.475	1.011	0.909	—	—
0.500	1.014	0.912	—	—
0.525	1.017	0.915	—	—
0.550	1.020	0.917	—	—
0.575	1.023	0.920	—	—
0.600	1.026	0.922	—	—
0.625	1.029	0.925	—	—
0.650	1.031	0.927	—	—
0.675	1.034	—	—	—
0.700	1.036	0.932	—	—
0.725	1.038	—	—	—
0.750	1.041	0.936	—	—

A 370

TABLE A8.1 Recommended Values for Rounding Test Data

Test Quantity	Test Data Range	Rounded Value ^a
Yield Point, Yield Strength, Tensile Strength	up to 50 000 psi, excl (up to 50 ksi) 50 000 to 100 000 psi, excl (50 to 100 ksi) 100 000 psi and above (100 ksi and above)	100 psi (0.1 ksi) 500 psi (0.5 ksi) 1000 psi (1.0 ksi)
	up to 500 MPa, excl 500 to 1000 MPa, excl 1000 MPa and above	1 MPa 5 MPa 10 MPa
Elongation	0 to 10 %, excl 10 % and above	0.5 % 1 %
Reduction of Area	0 to 10 %, excl 10 % and above	0.5 % 1 %
Impact Energy	0 to 240 ft-lbf (or 0 to 325 J)	1 ft-lbf (or 1 J) ^b
Brinell Hardness	all values	tabular value ^c
Rockwell Hardness	all scales	1 Rockwell Number


^a Round test data to the nearest integral multiple of the values in this column. If the data value is exactly midway between two rounded values, round in accordance with A8.1.1.2.

^b These units are not equivalent but the rounding occurs in the same numerical ranges for each. (1 ft-lbf = 1.356 J).

^c Round the mean diameter of the Brinell impression to the nearest 0.05 mm and report the corresponding Brinell hardness number read from the table without further rounding.

TABLE A10.1 Heat-Treat Record-Essential Variables

	Master Forging	Production Forging 1	Production Forging 2	Production Forging 3	Production Forging 4	Production Forging 5
Program chart number						
Time at temperature and actual temperature of heat treatment						
Method of cooling						
Forging thickness						
Thermocouple immersion						
Beneath buffer (yes/no)						
Forging number						
Product						
Material						
Thermocouple location—0 deg						
Thermocouple location—180 deg						
Quench tank No.						
Date of heat treatment						
Furnace number						
Cycle number						
Heat treater						
Starting quench medium temperature						
Time from furnace to quench						
Heating rate above 1000°F (538°C)						
Temperature upon removal from quench after 5 min						
Orientation of forging in quench						

 A 370

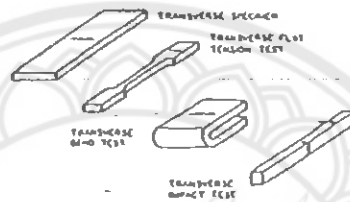
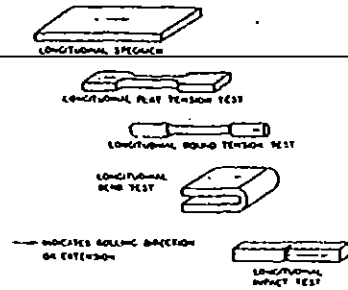
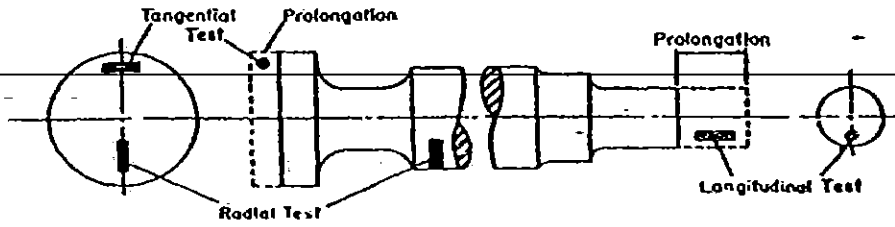


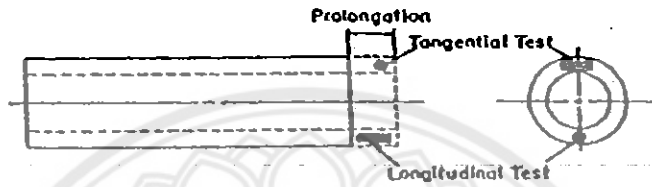
FIG. 1 The Relation of Test Coupons and Test Specimens to Rolling Direction or Extension (Applicable to General Wrought Products)



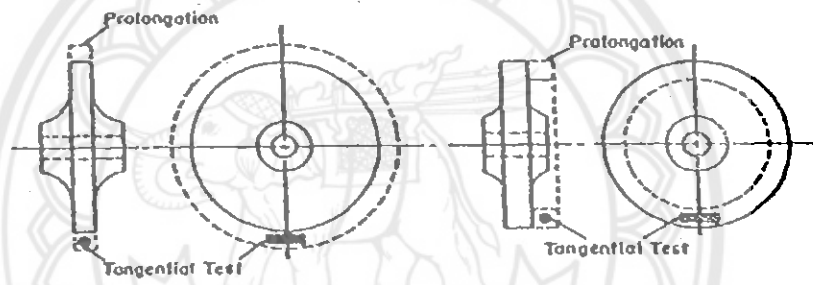
A 370



(a) Shafts and Rotors



(b) Hollow Forgings



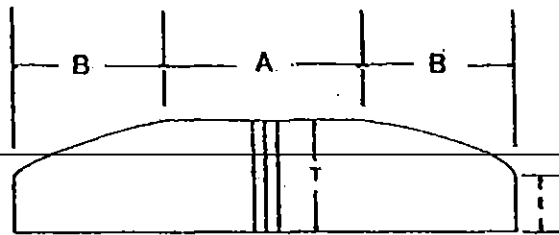
(c) Disk Forgings



(d) Ring Forgings

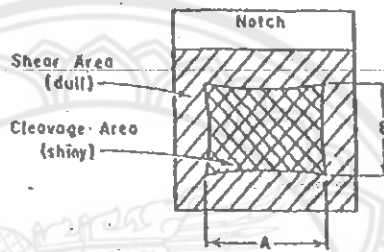
FIG. 2 Locations of Test Specimens for Various Types of Forgings

A 370



Dimension	Description	Requirement
A	Machined Surface	24 mm Minimum
B	Original OD Surface	13.5 mm Maximum
T	Specimen Thickness	Figure 11
t	End Thickness	1/2 T Minimum

FIG. 12 Tubular Impact Specimen Containing Original OD Surface



NOTE 1—Measure average dimensions A and B to the nearest 0.02 in. or 0.5 mm.
 NOTE 2—Determine the percent shear fracture using Table 7 or Table 8.

FIG. 13 Determination of Percent Shear Fracture

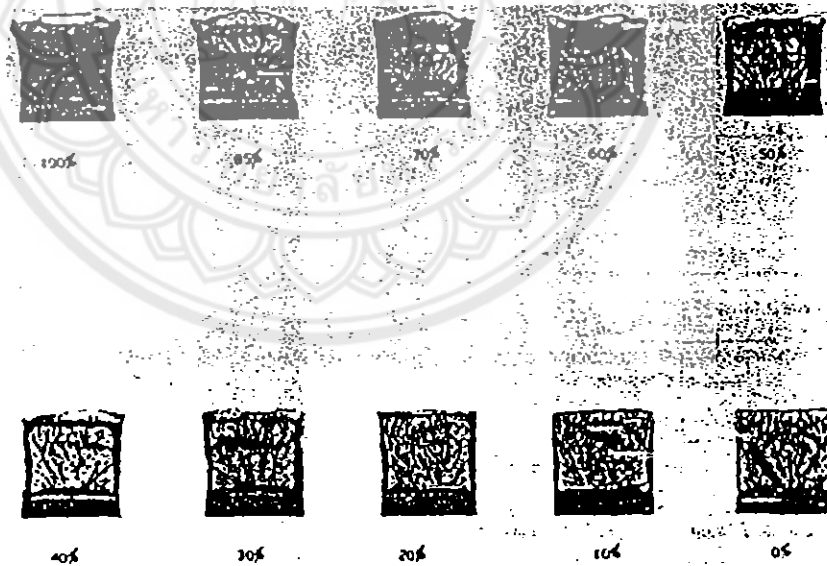


FIG. 14 Fracture Appearance Charts and Percent Shear Fracture Comparator

A 370

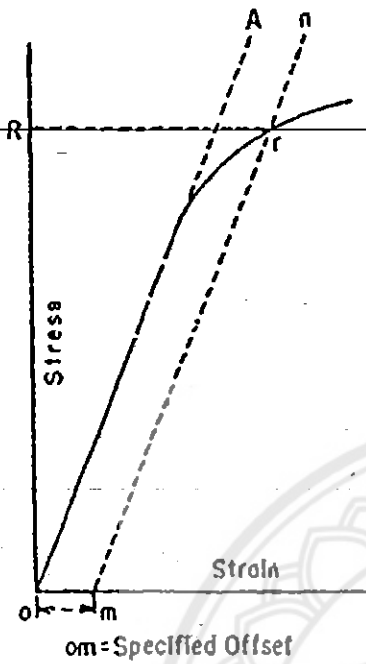
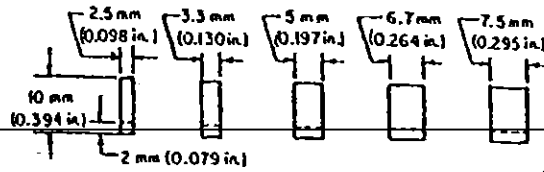


FIG. 9 Stress-Strain Diagram for Determination of Yield Strength by the Offset Method



NOTE 1—Permissible variations shall be as follows:

Notch length to edge	90 ± 2°
Adjacent sides shall be at	90° ± 10 min
Cross-section dimensions	± 0.075 mm (± 0.003 in.)
Length of specimen (L)	+ 0, - 2.5 mm (+ 0, - 0.100 in.)
Centering of notch (L/2)	± 1 mm (± 0.039 in.)
Angle of notch	± 1°
Radius of notch	± 0.025 mm (± 0.001 in.)
Notch depth	± 0.025 mm (± 0.001 in.)
Finish requirements	2 μm (63 μin.) on notched surface and opposite face; 4 μm (125 μin.) on other two surfaces

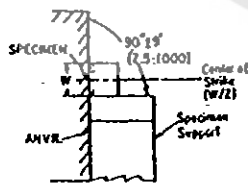
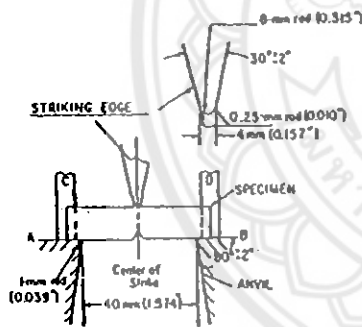
(a) Standard Full Size Specimen



(b) Standard Subsize Specimens

NOTE 2—On subsize specimens, all dimensions and tolerances of the standard specimen remain constant with the exception of the width, which varies as shown above and for which the tolerance shall be ± 1%.

FIG. 11 Charpy (Simple Beam) Impact Test Specimens



All dimensional tolerances shall be ± 0.05 mm (0.002 in.) unless otherwise specified.

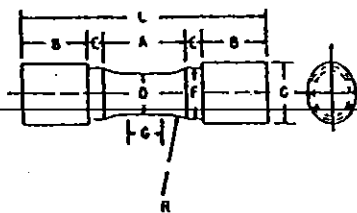
NOTE 1—A shall be parallel to B within 2:1000 and coplanar with B within 0.05 mm (0.002 in.).

NOTE 2—C shall be parallel to D within 20:1000 and coplanar with D within 0.125 mm (0.005 in.).

NOTE 3—Finish on unmarked parts shall be 4 μm (125 μin.).

FIG. 10 Charpy (Skimple-Deam) Impact Test

A 370



DIMENSIONS

	Specimen 1		Specimen 2		Specimen 3	
	in.	mm	in.	mm	in.	mm
G—Length of parallel	Shall be equal to or greater than diameter D					
D—Diameter	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.25	0.750 ± 0.015	20.0 ± 0.40	1.25 ± 0.025	30.0 ± 0.6
R—Radius of fillet, min	1	25	1	25	2	50
A—Length of reduced section, min	1½	32	1½	38	2½	60
L—Overall length, min	3¾	95	4	100	6¾	160
B—Grip section, approximate	1	25	1	25	1½	45
C—Diameter of end section, approximate	¾	20	1½	30	1½	48
E—Length of shoulder, min	¾	6	¾	6	¾	8
F—Diameter of shoulder	¾ ± ¼	16.0 ± 0.40	1½ ± ¼	24.0 ± 0.40	1½ ± ¼	36.5 ± 0.4

Note 1—The reduced section and shoulders (dimensions A, D, E, F, G, and R) shall be shown, but the ends may be of any form to fit the holders the testing machine in such a way that the load shall be axial. Commonly the ends are threaded and have the dimensions B and C given above.

FIG. 6 Standard Tension Test Specimens for Cast Iron

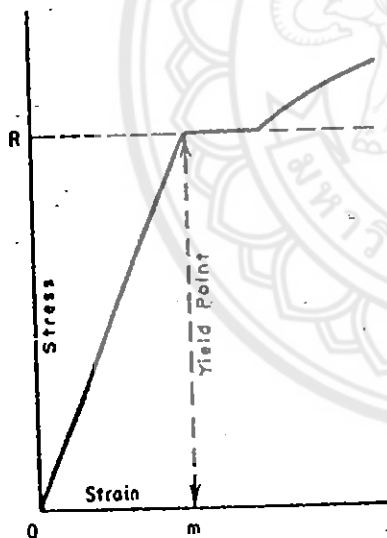


FIG. 7 Stress-Strain Diagram Showing Yield Point Corresponding with Top of Knee

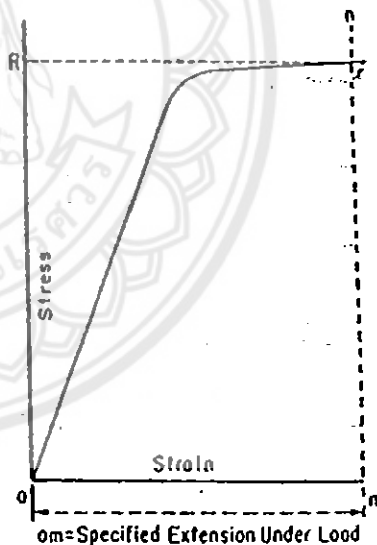

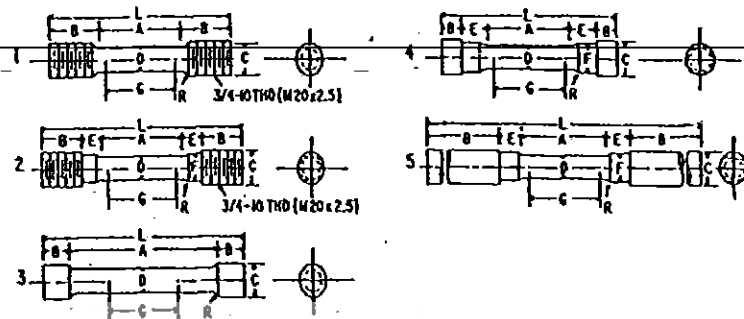


FIG. 8 Stress-Strain Diagram Showing Yield Point or Yield Strength by Extension Under Load Method

 A 370


DIMENSIONS


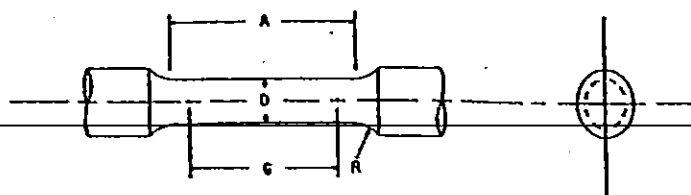
	Specimen 1		Specimen 2		Specimen 3		Specimen 4		Specimen 5	
	in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm
G—Gage length	2.000 ± 0.005	50.0 ± 0.10	2.000 ± 0.005	50.0 ± 0.10	2.000 ± 0.005	50.0 ± 0.10	2.000 ± 0.005	50.0 ± 0.10	2.00 ± 0.005	50.0 ± 0.10
D—Diameter (Note 1)	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.25	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.25	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.25	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.25	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.25
R—Radius of fillet, min	¼	10	¼	10	¼	2	¾	10	¼	10
A—Length of reduced section	2¼, min	60, min	2¼, min	60, min	4, approx- imately	100, approx- imately	2¼, min	60, min	2¼, min	60, min
L—Over-all length, approximate	5	125	5½	140	5½	140	4¾	120	9½	240
B—Grip section (Note 2)	1¾, approx- imately	35, approx- imately	1, approx- imately	25, approx- imately	¾, approx- imately	20, approx- imately	¾, approx- imately	13, approx- imately	3, min	75, min
C—Diameter of end section	¾	20	¾	20	¾	18	¾	22	¾	20
E—Length of shoulder and fillet section, approximate	—	—	¾	16	—	—	¾	20	¾	16
F—Diameter of shoulder	—	—	¾	16	—	—	¾	16	¾	15

Note 1—The reduced section may have a gradual taper from the ends toward the center with the ends not more than 0.005 in. (0.10 mm) larger in diameter than the center.

Note 2—On Specimen 5 it is desirable, if possible, to make the length of the grip section great enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two thirds or more of the length of the grips.

Note 3—The types of ends shown are applicable for the standard 0.500-in. round tension test specimen; similar types can be used for subsize specimens. The use of UNF series of threads (¾ by 16, ½ by 20, ¾ by 24, and ¼ by 28) is suggested for high-strength brittle materials to avoid fracture in the thread portion.

FIG. 5 Suggested Types of Ends for Standard Round Tension Test Specimens

 A 370


DIMENSIONS

Nominal Diameter	Standard Specimen		Small-Size Specimens Proportional to Standard							
	in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm
G—Gage length	2.00±	50.0 ±	1.400±	35.0 ±	1.000±	25.0 ±	0.640±	16.0 ±	0.450±	10.0 ±
	0.005	0.10	0.005	0.10	0.005	0.10	0.005	0.10	0.005	0.10
D—Diameter (Note 1)	0.500±	12.5±	0.350±	8.75 ±	0.250±	6.25 ±	0.160±	4.00 ±	0.113±	2.50 ±
	0.010	0.25	0.007	0.18	0.005	0.12	0.003	0.08	0.002	0.05
R—Radius of fillet, min	3/4	10	3/4	6	3/4	5	3/4	4	3/4	2
A—Length of reduced section, min (Note 2)	2 1/4	60	1 1/4	45	1 1/4	32	3/4	20	3/4	16

NOTE 1—The reduced section may have a gradual taper from the ends toward the center, with the ends not more than 1 percent larger in diameter than the center (controlling dimension).

NOTE 2—If desired, the length of the reduced section may be increased to accommodate an extensometer of any convenient gage length. Reference marks for the measurement of elongation should, nevertheless, be spaced at the indicated gage length.


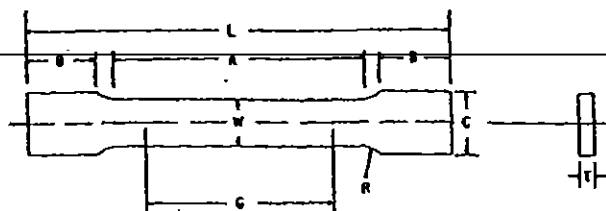
NOTE 3—The gage length and fillets shall be as shown, but the ends may be of any form to fit the holders of the testing machine in such a way that the load shall be axial (see Fig. 9). If the ends are to be held in wedge grips it is desirable, if possible, to make the length of the grip section great enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two thirds or more of the length of the grips.

NOTE 4—On the round specimens in Fig. 5 and Fig. 6, the gage lengths are equal to four times the nominal diameter. In some product specifications other specimens may be provided for, but unless the 4-to-1 ratio is maintained within dimensional tolerances, the elongation values may not be comparable with those obtained from the standard test specimen.

NOTE 5—The use of specimens smaller than 0.250-in. (6.25-mm) diameter shall be restricted to cases when the material to be tested is of insufficient size to obtain larger specimens or when all parties agree to their use for acceptance testing. Smaller specimens require suitable equipment and great skill in both machining and testing.

NOTE 6—Five sizes of specimens often used have diameters of approximately 0.505, 0.357, 0.252, 0.160, and 0.113 in., the reason being to permit calculations of stress from loads, since the corresponding cross sectional areas are equal or close to 0.200, 0.100, 0.0500, 0.0200, and 0.0100 in² respectively. Thus, when the actual diameters agree with these values, the stresses (or strengths) may be computed using the simple multiplying factors 5, 10, 20, 50, and 100, respectively. (The metric equivalents of these fixed diameters do not result in correspondingly convenient cross sectional area multiplying factors.)

FIG. 4 Standard 0.500-in. (12.5-mm) Round Tension Test Specimen with 2-in. (50-mm) Gage Length and Examples of Small-Size Specimens Proportional to the Standard Specimens

 A 370


DIMENSIONS

	Standard Specimens				Subsize Specimen	
	Plate-Type, 1½-in. Wide		Sheet-Type, ½-in. Wide		½-in. Wide	
	in.	mm	in.	mm	in.	mm
G—Gage length (Notes 1 and 2)	8.00 ± 0.01	200 ± 0.25	2.000 ± 0.005	50.0 ± 0.10	1.000 ± 0.003	25.0 ± 0.08
W—Width (Notes 3, 5, and 6)	1½ + ¼ - ¼	40 + 3 - 6	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.25	0.250 ± 0.002	6.25 ± 0.05
T—Thickness (Note 7)			thickness of material			
R—Radius of fillet, min (Note 4)	½	13	½	13	¼	6
l _o —Over-all length, min (Notes 2 and 8)	18	450	8	200	4	100
A—Length of reduced section, min	9	225	2¼	60	1¼	32
B—Length of grip section, min (Note 9)	3	75	2	50	1¼	32
C—Width of grip section, approximate (Notes 4, 10, and 11)	2	50	¾	20	¾	19

Note 1—For the 1½-in. (40-mm) wide specimen, punch marks for measuring elongation after fracture shall be made on the flat or on the edge of the specimen and within the reduced section. Either a set of nine or more punch marks 1 in. (25 mm) apart, or one or more pairs of punch marks 8 in. (200 mm) apart may be used.

Note 2—For the ½-in. (12.5-mm) wide specimen, gage marks for measuring the elongation after fracture shall be made on the ½-inch (12.5-mm) face or on the edge of the specimen and within the reduced section. Either a set of three or more marks 1.0 in. (25 mm) apart or one or more pairs of marks 2 in. (50 mm) apart may be used.

Note 3—For the three sizes of specimens, the ends of the reduced section shall not differ in width by more than 0.004, 0.002 or 0.001 in. (0.10, 0.05 or 0.025 mm), respectively. Also, there may be a gradual decrease in width from the ends to the center, but the width at either end shall not be more than 0.015 in., 0.005 in., or 0.003 in. (0.40, 0.10 or 0.08 mm), respectively, larger than the width at the center.

Note 4—For each specimen type, the radii of all fillets shall be equal to each other with a tolerance of 0.05 in. (1.25 mm), and the centers of curvature of the two fillets at a particular end shall be located across from each other (on a line perpendicular to the centerline) within a tolerance of 0.10 in. (2.5 mm).

Note 5—For each of the three sizes of specimens, narrower widths (*W* and *C*) may be used when necessary. In such cases the width of the reduced section should be as large as the width of the material being tested permits; however, unless stated specifically, the requirements for elongation in a product specification shall not apply when these narrower specimens are used. If the width of the material is less than *W*, the sides may be parallel throughout the length of the specimen.

Note 6—The specimen may be modified by making the sides parallel throughout the length of the specimen, the width and tolerances being the same as those specified above. When necessary a narrower specimen may be used, in which case the width should be as great as the width of the material being tested permits. If the width is 1½ in. (38 mm) or less, the sides may be parallel throughout the length of the specimen.

Note 7—The dimension *T* is the thickness of the test specimen as provided for in the applicable material specifications. Minimum nominal thickness of 1½-in. (40-mm) wide specimens shall be ⅜ in. (5 mm), except as permitted by the product specification. Maximum nominal thickness of ½-in. (12.5-mm) and ¼-in. (6-mm) wide specimens shall be ⅜ in. (19 mm) and ¼ in. (6 mm), respectively.

Note 8—To aid in obtaining axial loading during testing of ¼-in. (6-mm) wide specimens, the over-all length should be as the material will permit.

Note 9—It is desirable, if possible, to make the length of the grip section large enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two thirds or more of the length of the grips. If the thickness of ¼-in. (13-mm) wide specimens is over ¼ in. (10 mm), longer grips and correspondingly longer grip sections of the specimen may be necessary to prevent failure in the grip section.

Note 10—For standard sheet-type specimens and subsize specimens the ends of the specimen shall be symmetrical with the center line of the reduced section within 0.01 and 0.005 in. (0.25 and 0.13 mm), respectively. However, for steel if the ends of the ½-in. (12.5-mm) wide specimen are symmetrical within 0.05 in. (1.0 mm) a specimen may be considered satisfactory for all but referee testing.

Note 11—For standard plate-type specimens the ends of the specimen shall be symmetrical with the center line of the reduced section within 0.25 in. (6.35 mm) except for referee testing in which case the ends of the specimen shall be symmetrical with the center line of the reduced section within 0.10 in. (2.5 mm).

FIG. 3 Rectangular Tension Test Specimens

A 370



FIG. 15 Halves of Broken Charpy V-Notch Impact Specimen Joined for the Measurement of Lateral Expansion, Dimension *A*

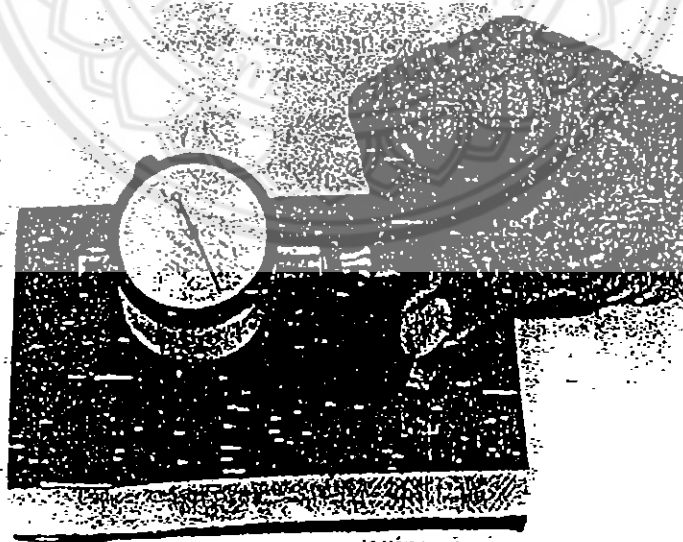
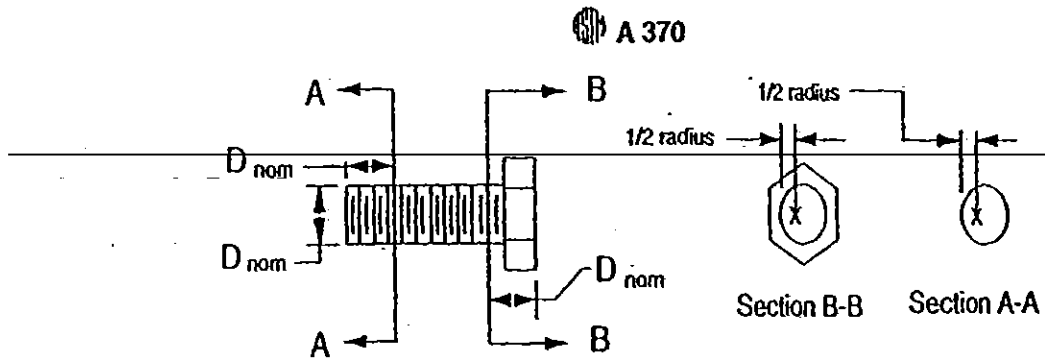


FIG. 16 Lateral Expansion Gage for Charpy Impact Specimens



X=Location of Hardness Impressions

FIG. A3.6 Hardness Test Locations for Bolts in a Dispute

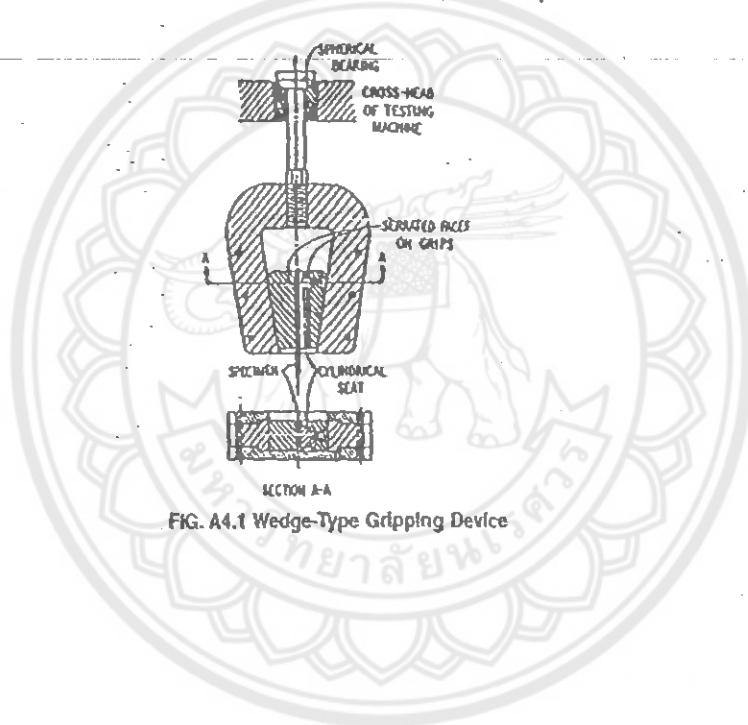
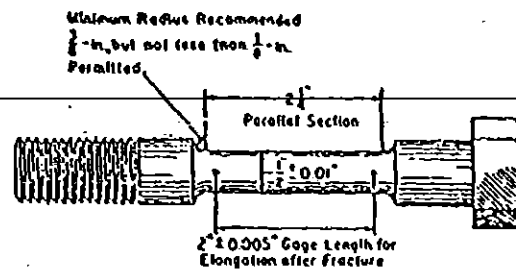
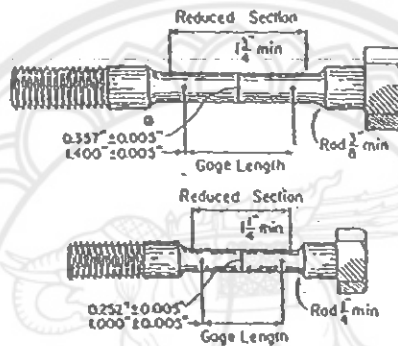


FIG. A4.1 Wedge-Type Gripping Device

A 370



Note 1—Metric equivalent: 1 in. = 25.4 mm.
FIG. A3.3 Tension Test Specimen for Bolt with Turned-Down Shank



Note 1—Metric equivalent: 1 in. = 25.4 mm.
FIG. A3.4 Examples of Small Size Specimens Proportional to Standard 2-in. Gage Length Specimen

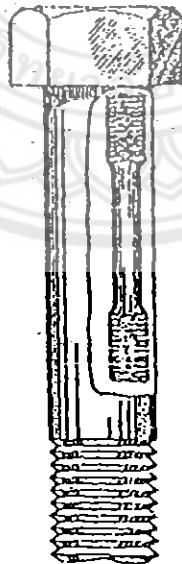

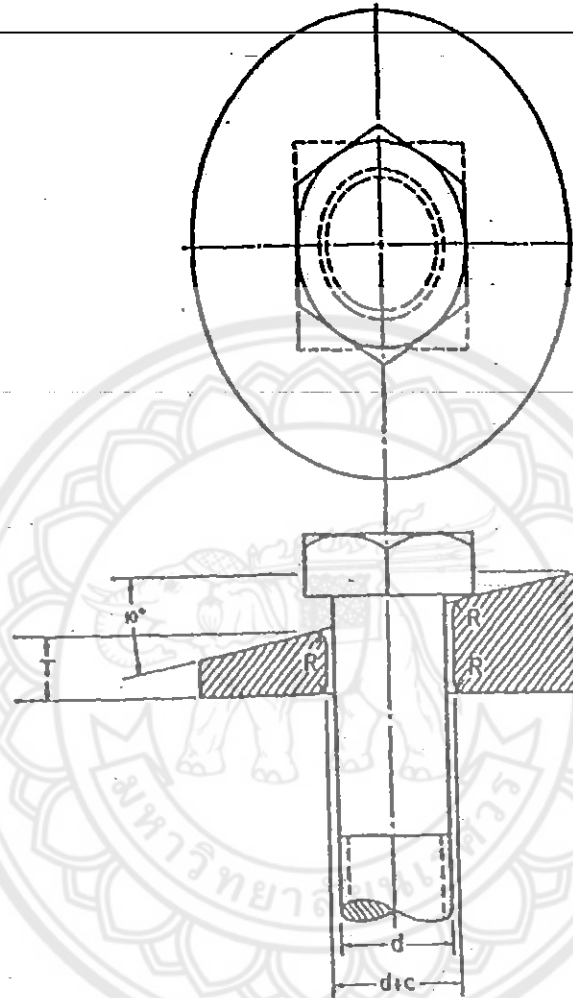


FIG. A3.5 Location of Standard Round 2-in. Gage Length Tension Test Specimen When Turned from Large Size Bolt

 A 370



c = Clearance of wedge hole

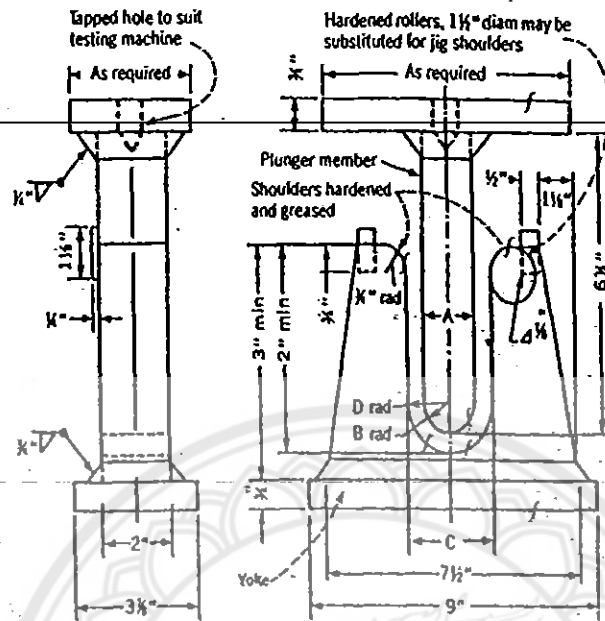
d = Diameter of bolt

R = Radius

T = Thickness of wedge at short side of hole equal to one-half diameter of bolt

FIG. A3.2 Wedge Test Detail

A 370



Note 1—Metric equivalent: 1 in. = 25.4 mm.

Test Specimen Thickness, in.	A	B	C	D	Material
$\frac{7}{8}$	$1\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	$2\frac{3}{4}$	$1\frac{3}{4}$	Materials with a specified minimum tensile strength of 95 ksi or greater.
1	$4l$	$2l$	$6l + \frac{1}{4}$	$3l + \frac{1}{4}$	
$\frac{5}{8}$	$2\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{4}$	$3\frac{3}{4}$	$1\frac{1}{4}$	Materials with a specified minimum tensile strength of 95 ksi or greater.
1	$6\frac{3}{4}l$	$3\frac{3}{4}l$	$8\frac{3}{4}l + \frac{1}{4}$	$4\frac{1}{4}l + \frac{1}{4}$	

FIG. A2.15 Guided-Bend Test Jlg

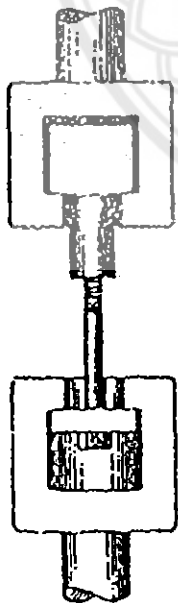
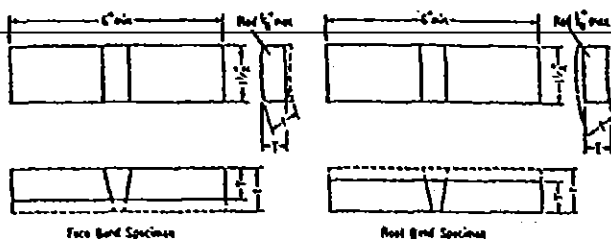


FIG. A3.1 Tension Testing Full-Size Bolt

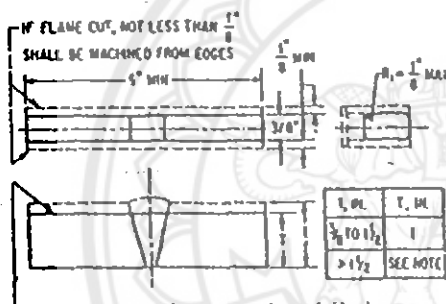
A 370



Note 1—Metric equivalent: 1 in. = 25.4 mm.

Pipe Wall Thickness (t, in.)	Test Specimen Thickness, in.
Up to $\frac{3}{8}$, incl	t
Over $\frac{3}{8}$	$\frac{3}{8}$

FIG. A2.13 Transverse Face- and Root-Bend Test Specimens



When t exceeds $1\frac{1}{2}$ use one of the following:

1. Cut along line indicated by arrow. Edge may be flame cut and may or may not be machined.
2. Specimens may be cut into approximately equal strips between $\frac{3}{8}$ in. and $1\frac{1}{2}$ in. wide for testing or the specimens may be bent at full width (see requirements on jig width in Fig. 12.)

Note 1—Metric equivalent: 1 in. = 25.4 mm.

FIG. A2.14 Side-Bend Specimen for Ferrous Materials

A 370

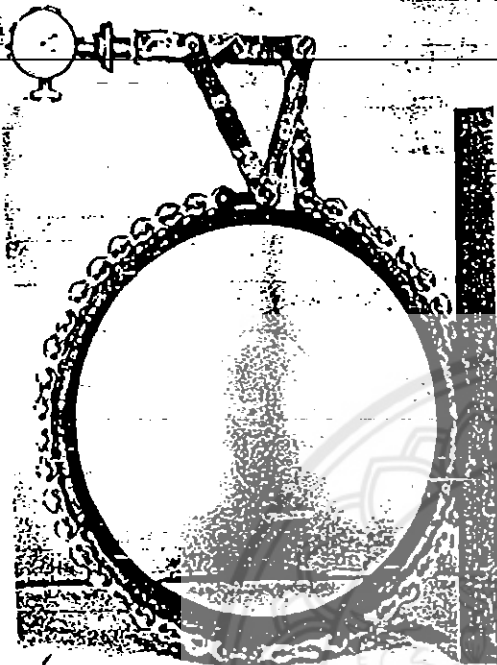


FIG. A2.8 Roller Chain Type Extensometer, Clamped

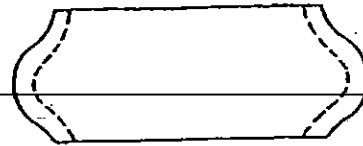
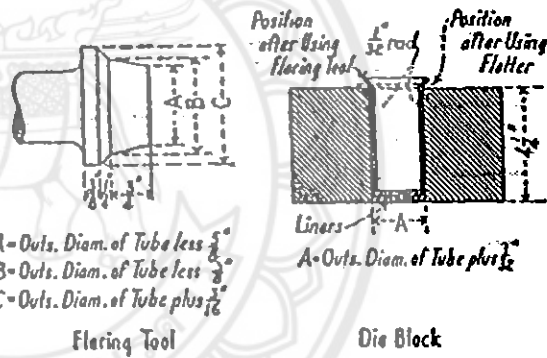


FIG. A2.10 Crush Test Specimen



Note 1—Metric equivalent: 1 in. = 25.4 mm.
FIG. A2.11 Flaring Tool and Die Block for Flange Test

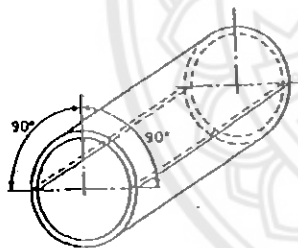


FIG. A2.9 Reverse Flattening Test

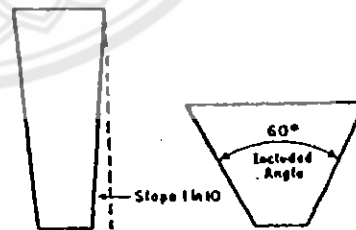
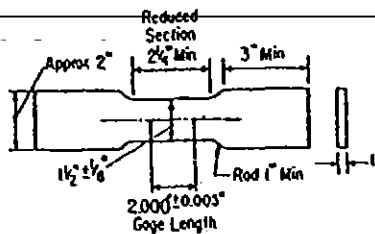


FIG. A2.12 Tapered Mandrels for Flaring Test

A 370



Note 1—The dimension t is the thickness of the test specimen as provided for in the applicable material specifications.

Note 2—The reduced section shall be parallel within 0.010 in. and may have a gradual taper in width from the ends toward the center, with the ends not more than 0.010 in. wider than the center.

Note 3—The ends of the specimen shall be symmetrical with the center line of the reduced section within 0.10 in.

Note 4—Metric equivalent: 1 in. = 25.4 mm.

FIG. A2.5 Transverse Tension Test Specimen Machined from Ring Cut from Tubular Products

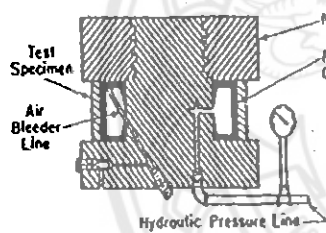


FIG. A2.6 Testing Machine for Determination of Transverse Yield Strength from Annular Ring Specimens

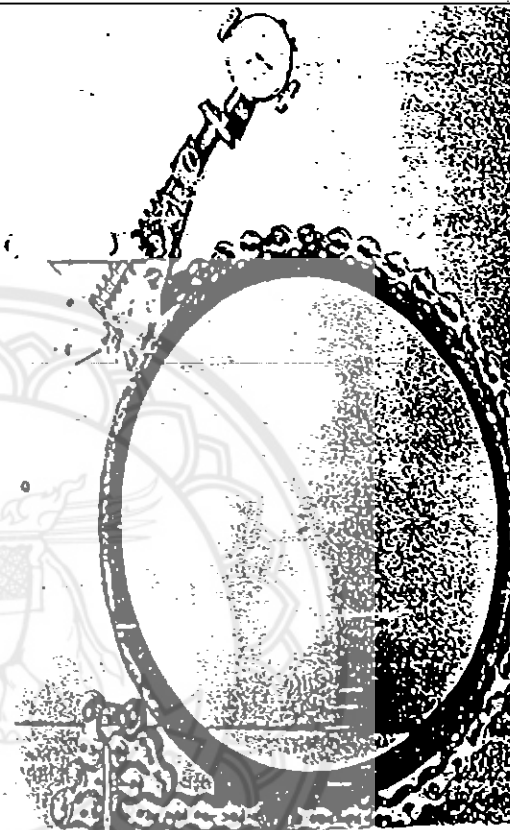
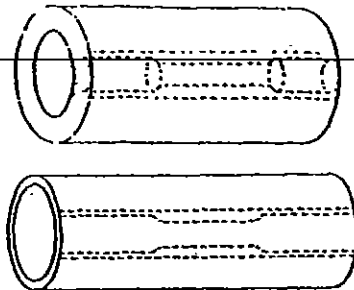


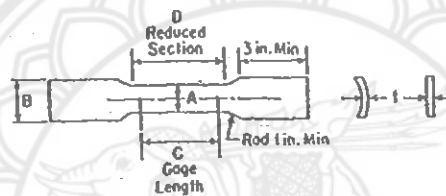
FIG. A2.7 Roller Chain Type Extensometer, Unclamped

A 370



NOTE 1—The edges of the blank for the specimen shall be cut parallel to each other.

FIG. A2.2 Location of Longitudinal Tension-Test Specimens in Tubing



DIMENSIONS

Specimen No.	Dimensions, in.			
	A	B	C	D
1	$\frac{1}{2} \pm 0.015$	$\frac{1}{4}$ approximately	2 ± 0.005	$2\frac{1}{4}$ min
2	$\frac{3}{4} \pm 0.031$	1 approximately	2 ± 0.005	$2\frac{1}{4}$ min
			4 ± 0.005	$4\frac{1}{2}$ min
3	1 ± 0.062	$1\frac{1}{2}$ approximately	2 ± 0.005	$2\frac{1}{4}$ min
			4 ± 0.005	$4\frac{1}{2}$ min
4	$1\frac{1}{2} \pm \frac{1}{8}$	2 approximately	2 ± 0.010	$2\frac{1}{4}$ min
			4 ± 0.015	$4\frac{1}{2}$ min
			8 ± 0.020	9 min

- NOTE 1—Cross-sectional area may be calculated by multiplying A and t.
 NOTE 2—The dimension t is the thickness of the test specimen as provided for in the applicable material specifications.
 NOTE 3—The reduced section shall be parallel within 0.010 in. and may have a gradual taper in width from the ends toward the center, with the ends not more than 0.010 in. wider than the center.
 NOTE 4—The ends of the specimen shall be symmetrical with the center line of the reduced section within 0.10 in.
 NOTE 5—Metric equivalent: 1 in. = 25.4 mm.
 NOTE 6—Specimens with sides parallel throughout their length are permitted, except for referee testing, provided: (a) the above tolerances are used; (b) an adequate number of marks are provided for determination of elongation; and (c) when yield strength is determined, a suitable extensometer is used. If the fracture occurs at a distance of less than 2A from the edge of the gripping device, the tensile properties determined may not be representative of the material. If the properties meet the minimum requirements specified, no further testing is required, but if they are less than the minimum requirements, discard the test and retest.

FIG. A2.3 Dimensions and Tolerances for Longitudinal Strip Tension Test Specimens for Tubing

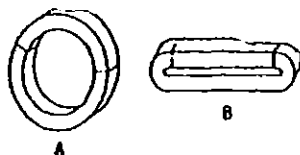


FIG. A2.4 Location of Transverse Tension Test Specimens in Ring Cut from Tubular Products.

A 370

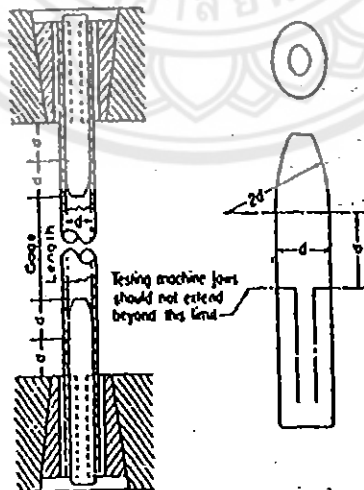
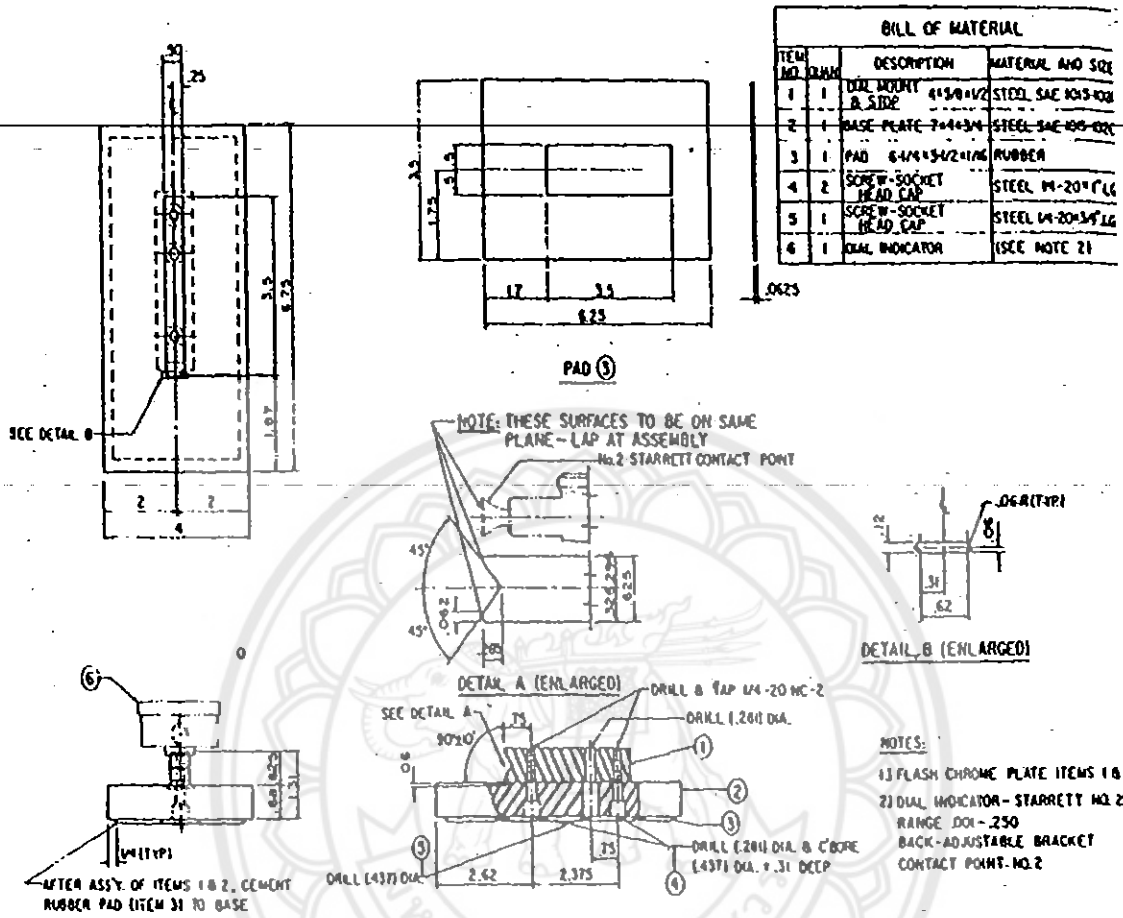


FIG. A2.1 Metal Plugs for Testing Tubular Specimens, Proper Location of Plugs in Specimen and of Specimen in Heads of Testing Machine

A 370

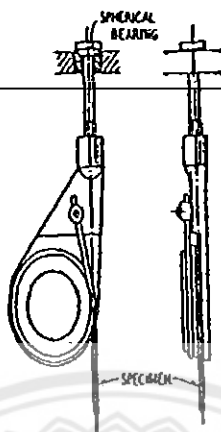


FIG. A4.2 Snubbing-Type Gripping Device

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.

This standard is copyrighted by ASTM, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (<http://www.astm.org>).

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายกิตติพงษ์ คำไพเราะพันธุ์
ภูมิลำเนา 258/2 หมู่ 8 ต.ทุ่งเสลี่ยม อ.ทุ่งเสลี่ยม จ.สุโขทัย
ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสวรรคตอนันต์วิทยา
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: kittipong_kumpai@hotmail.com



ชื่อ นางสาวนุชจรี เย็นขัน
ภูมิลำเนา 149 หมู่ 1 ต.กกสะทอน อ.คำน้อข้อย จ.เลย
ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนหล่มเก่าพิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: nushjaree_672530@hotmail.com